

UNIVERSIDAD ESTATAL A DISTANCIA
VICERRECTORÍA ACADÉMICA
ESCUELA DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES
MAESTRÍA ACADÉMICA EN MANEJO DE RECURSOS NATURALES
CON ENFÁSIS EN GESTIÓN AMBIENTAL

Monitoreo de nitratos en los drenajes de palma aceitera (*Elaeis guineensis*): una herramienta para la sostenibilidad del cultivo

Tesis presentada al Tribunal Examinador del Programa de Maestría Académica
en Manejo de Recursos Naturales de la Escuela de Ciencias Exactas y
Naturales para optar por el grado de *Magister Scientiae* con énfasis en gestión
ambiental

Laura Hernández Alpízar

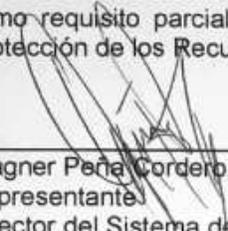
Director de tesis: Jesús Mora Molina, jmora@itcr.ac.cr
Lector de tesis: Alexander Berrocal Jiménez, aberrocal@itcr.ac.cr
Lector de tesis: Federico Masis Meléndez, fmasis@itcr.ac.cr

San José, Costa Rica

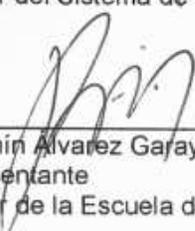
Septiembre, 2019

TRIBUNAL EXAMINADOR

Este proyecto de Graduación ha sido aceptado y aprobado en su forma presente por el Tribunal Examinador del Programa de Maestría Académica en Manejo de Recursos Naturales del Sistema de Estudios de Postgrado de la Universidad Estatal a Distancia, como requisito parcial para optar por el grado de Magister Scientiae en Manejo y Protección de los Recursos Naturales con énfasis en Gestión Ambiental

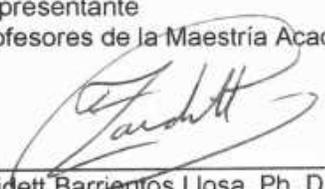


Wagner Peña Cordero, Ph.D.
Representante
Director del Sistema de Estudios de Posgrado

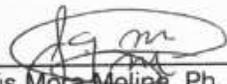


Benjamín Álvarez Garay, M.Sc.
Representante
Director de la Escuela de Ciencias Exactas y Naturales

Harold Arias LeClaire, Ph.D.
Representante
Profesores de la Maestría Académica en Manejo de Recursos Naturales



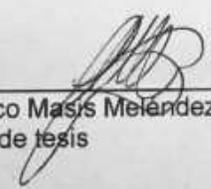
Zaidett Barrientos Llosa, Ph. D.
Coordinadora
Maestría Académica en Manejo de Recursos Naturales



Jesús Mora Molina, Ph. D.
Director de Tesis



Alexander Berrocal Jiménez. Ph. D.
Lector de tesis



Federico Masís Meléndez. Ph. D.
Lector de tesis

Dedicatoria

Le dedico este esfuerzo a la recuperación del equilibrio de la vida humana en la naturaleza.

Agradecimientos

A mi familia: mi madre invencible, mi padre amoroso, mis amigas Jenny y Angélica de presencia en un día con sol y en el que no también, a mi hermano precioso con el que compartimos la pasión y la observación por lo natural.

Agradezco a mis compañeros Ricardo y Jesús que son apoyo y cariño mutuo con todas las letras.

Agradezco al comité que leyó, aportó críticamente y me ayudó significativamente a mejorar esta investigación y la divulgación de resultados.

Gracias

Índice

Resumen	5
Abstract	6
Introducción	7
Materiales y Métodos	8
Resultados	11
Discusión	13
Agradecimientos	14
Referencias	15
Conclusiones y recomendaciones	18
Anexo 1. Carta de recepción de la revista científica: cuadernos de investigación UNED	19
Anexo 2. Descripción del suelo	20

Monitoreo de nitratos en los drenajes de palma aceitera (*Elaeis guineensis*): una herramienta para la sostenibilidad del cultivo

Laura Hernández Alpízar

Maestría Académica en Manejo de Recursos Naturales, UNED.

lahernandez@itcr.ac.cr

(Este trabajo fue sometido a la revista Cuadernos de investigación UNED para su publicación formal. Debe buscarse como: Hernández Alpízar, L., J. Mora Molina & R. Coy Herrera. Monitoreo de nitratos en los drenajes de palma aceitera (*Elaeis guineensis*): una herramienta para la sostenibilidad del cultivo. Anexo 1.)

RESUMEN: Las pérdidas del nitrógeno adicionado a las plantaciones de palma aceitera (*Elaeis guineensis* Jacq.) en fertilizantes, suceden mayoritariamente por arrastre pluvial o lixiviación de nitratos y su reducción es fundamental para el desarrollo de esta actividad. **Objetivo:** En este trabajo se evalúa el monitoreo de nitratos en los drenajes del cultivo de palma aceitera como una herramienta de información para la aplicación mejorada del fertilizante. **Metodología:** Se selecciona una finca fertilizada homogéneamente y las muestras son tomadas en cuatro drenajes agrícolas ubicados en áreas de diferente clase textural, antes y después de la fertilización. Se examina la tendencia y diferencias estadísticas de la carga de nitratos en los drenajes, $Q_{NO_3^-}$ (mgs^{-1}). **Resultados:** $Q_{NO_3^-}$ aumenta después de la fertilización, sin embargo, existe una diferencia significativa en la varianza de $Q_{NO_3^-}$ en los drenajes (0,000033, alfa=0.05) determinada por $Q_{NO_3^-}$ del drenaje ubicado en suelo de clase textural arcillosa (Q4). El aumento de $Q_{NO_3^-}$ en Q4 exhibe una velocidad de crecimiento más positiva seguida de una disminución más negativa después de la fertilización. **Discusión:** Las diferencias de magnitud y varianza de $Q_{NO_3^-}$ en los drenajes, relacionadas con la clase textural del suelo drenado se explica por el diferente desarrollo de las raíces y la diferente interacción y profundidad a la que suceden los procesos de lavado, asimilación, procesamiento y lixiviación de nitratos. **Conclusiones:** El monitoreo de nitratos en los drenajes de palma aceitera da información del diferente procesamiento del nitrógeno en el suelo en relación con la clase textural y el desarrollo de las raíces de las plantas. La varianza de $Q_{NO_3^-}$ sirve para tomar decisiones sobre la aplicación reducida o retrasada de fertilizante. Se recomienda el monitoreo de nitratos en los drenajes como una herramienta para el manejo sostenible del cultivo.

Palabras clave: palma aceitera, fertilización, nitratos, agricultura sostenible, agricultura de precisión, recursos naturales.

ABSTRACT: Nitrate monitoring in oil palm drainages (*Elaeis guineensis* Jacq.): A tool for crop sustainability. **Introduction:** The nitrogen losses added in fertilizers to oil palm plantations (*Elaeis guineensis* Jacq.) mainly occur due to superficial washing or nitrate leaching, and their reduction is essential for the development of this activity. **Objective:** In this work, the monitoring of nitrates in oil palm crop drains is evaluated as an information tool for the improved application of the fertilizer. **Methodology:** A homogeneously fertilized farm is selected for the study. The samples are taken in four agricultural drains located in areas of different textural class, before and after fertilization. The trend and statistical differences in nitrate load of the drains, $Q_{NO_3^-}$ ($mg\ s^{-1}$), are examined. **Results:** $Q_{NO_3^-}$ increases after fertilization, nevertheless, there is a significant difference in the $Q_{NO_3^-}$ variance (0.000033, alpha = 0.05) determined by the drainage located in soil of clayey textural class (Q4). The $Q_{NO_3^-}$ increase in Q4 exhibits a more positive rate followed of a more negative decrease after fertilization. **Discussion:** The differences in magnitude and variance of $Q_{NO_3^-}$ in drains, related to the textural class of the drained soil are explained by the varied development of the roots and the different interaction and depth to which the washing, assimilation, processing and nitrate leaching. **Conclusions:** Nitrate monitoring in oil palm drains gives information on the different processing of nitrogen in the soil in relation to the textural class and the development of plant roots. The variance of $Q_{NO_3^-}$ serves to take decisions about the reduced or delayed application of fertilizer. Nitrate monitoring in drains is recommended as a tool for sustainable crop management.

Key words: oil palm, fertilization, nitrates, sustainable agriculture, precision agriculture, natural resources.

INTRODUCCIÓN

La palma aceitera (*Elaeis guineensis* Jacq.) es el origen del 36% del mercado de aceites de semillas oleaginosas a nivel global (United States Department of Agriculture (USDA), 2017). En las últimas décadas, el área de su cultivo tuvo un crecimiento exponencial acorde con una fuerte demanda y altos precios del producto que se elevaron continuamente hasta el 2011 (USDA, 2017). Después de este periodo el precio bajó hasta un 60%, lo que afecta principalmente a los cultivadores de pequeña escala que son entre 40% y 60% del total (Boons & Mendoza, 2010; Rist, Feintrenie, & Levang, 2010; Román & Angulo, 2013; SEPSA, 2016).

El cultivo de palma abarca grandes territorios, ejerce presión y se introduce en áreas boscosas naturales, turberas y humedales no dedicados previamente a la agricultura, lo cual tiene una afectación a su composición biológica y sus servicios ecosistémicos. Este impacto negativo está bien documentado en las regiones tropicales donde se cultiva en mayor cantidad: Indonesia, Malasia y el trópico de América Latina (Cunha, De Assis Montag, & Juen, 2015; Dislich et al., 2017; Konopik, Gray, Grafe, Steffan-Dewenter, & Fayle, 2014; Nainar et al., 2016; Walsh et al., 2016).

En Costa Rica la cobertura del cultivo de palma aceitera es alrededor de 70000 hectáreas ubicadas principalmente en el pacífico Central y Sur, y son producto de un aumento de casi 300% en el área de cultivo entre los años 1984 y 2015 (Instituto Nacional de Estadística y Censo, 2015). Su continuo crecimiento se desarrolla alrededor de regiones naturales protegidas como es el caso del Humedal Nacional Terraba Sierpe, un humedal RAMSAR ubicado en el cantón de Osa (Román & Angulo, 2013). El cultivo en esta zona ha determinado el empobrecimiento de alrededor del 50% de la riqueza de anfibios y reptiles (Gallmetzer & Schulze, 2015).

Con el objetivo de mantener y mejorar los rendimientos de producción durante los 25-30 años del ciclo de vida de la palma aceitera, se recomienda utilizar una fertilización intensiva con formulaciones nitrogenadas de producción industrial, y esta fertilización es vista por algunos autores como una forma de limitar su área de expansión (Boons & Mendoza, 2010; Hoffmann et al., 2017; Khatun, Reza, Moniruzzaman, & Yaakob, 2017; Pirker, Mosnier, Kraxner, Havlík, & Obersteiner, 2016; Woittiez, van Wijk, Slingerland, van Noordwijk, & Giller, 2017). Sin embargo, la fertilización es entre 25 y 30% del costo de producción del cultivo, y los pequeños agricultores tienen dificultades para realizarla, especialmente cuando enfrentan problemas económicos por la baja del precio del producto (Colchester et al., 2013; Khatun et al., 2017).

Por otra parte, el uso intensivo de fertilizantes industriales disparó la introducción a la atmósfera de óxidos de nitrógeno, con un potente efecto invernadero, y la presencia en exceso de nitratos lixiviados o arrastrados superficialmente hacia el recurso hídrico que pueden provocar efectos ambientales negativos de alto impacto a nivel global tales como la acidificación de suelos, la contaminación de aguas subterráneas o la eutrofización de aguas superficiales y costeras (Fowler et al., 2013; Galloway et al., 2008; Olivares, Bedmar, & Sanjuán, 2013). El alto riesgo de impactos desconocidos para el planeta que resulta de este desequilibrio entre la alta fijación antropogénica del nitrógeno en especies reactivas (formas reducidas y oxidadas) y su degradación natural, se cita junto a otros grandes problemas globales como el cambio climático o la pérdida de biodiversidad (Steffen et al., 2015, Rockström et al., 2009).

En la fertilización intensiva del cultivo de palma aceitera se obtienen grandes pérdidas del nitrógeno adicionado, principalmente por lixiviación de nitratos (80%) y hasta un 34% en palmas jóvenes (Pardon et al., 2016). En el proceso de lixiviación interviene la clase textural del suelo. La diferencia en el flujo derivada del mezclado incompleto entre el agua que se infiltra, y el agua localizada en pequeños poros del suelo, varía con la textura, así como varía la interacción de los iones con los sitios de intercambio catiónico o aniónico (Annandale et al., 2013; Van der Laan, Stirzaker, Annandale, Bristow, & Preez, 2010). El uso excesivo de fertilizantes modifica la estructura del suelo e incrementa el proceso de lixiviación (Dubos, Snoeck, & Flori, 2017). La medición de la lixiviación en suelos heterogéneos, muy estructurados o arcillosos, es difícil (Addiscott, 1996). Además, en las zonas tropicales, donde se cultiva principalmente la palma aceitera, abundan los suelos aluviales en los que la capa superficial (<30 cm) puede presentar variaciones significativas de la textura en distancias menores a 400 metros (Owens, Whisler, Jenkins, Thomasson, & Iqbal, 2005). Esta variabilidad cambia con las inundaciones y el tiempo de manera que gestionar con precisión la administración de fertilizante necesita de un análisis frecuente del suelo y las plantas (Hoffmann et al., 2017; Reza et al., 2016; Owens et al., 2005).

Sin embargo, ya que la calidad de la producción del cultivo de palma aceitera está limitada por la baja aeración y gran humedad de las zonas tropicales, generalmente, se construye entre hileras de siembra avenamientos o drenajes superficiales agrícolas con una profundidad entre 1-1,5 metros, los cuales sirven para mantener la tabla de agua por debajo de las raíces (Duran & Ortiz, 1995), y estos drenajes agrícolas superficiales han mostrado gran eficiencia en la recepción de lixiviados de nitratos de los cultivos (Estrada-Botello et al., 2007). El contenido de nitratos en un drenaje puede estar determinado por factores tales como la intensidad de la fertilización o del lavado pluvial, el procesamiento del suelo, su clase textural o el desarrollo de los raíces y el nivel de agua, y todos estos elementos son identificados de gran peso en el modelaje de rendimientos de plantaciones maduras de palma (Pardon et al., 2017).

En este estudio se presenta la utilización del monitoreo de nitratos en drenajes superficiales de un cultivo de palma, para la determinación de su tendencia con la aplicación de fertilizante y su relación con diferentes características del suelo drenado y condiciones de la planta, y adicionalmente, se discute su uso como herramienta para la toma de decisiones de aplicación del fertilizante.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en una finca de palma aceitera de 19 hectáreas ubicada en Palmar Norte, provincia Puntarenas, Costa Rica. Esta región se caracteriza por presentar bosque húmedo tropical con suelos de tipo inceptisol (según clasificación USDA, Centro de Investigación Agronómicas, UCR, 2016). El clima es de tipo PS2 con lluvias anuales entre 2000 y 4000 mm que merman entre enero y abril (Solano & Villalobos, 2000). La finca tiene cuatro hectáreas con plantas de seis años y quince hectáreas con plantas de doce años. Esta diferencia no plantea requerimientos de nutrición muy diferentes (Pardon et al., 2017). La totalidad del terreno se mantiene limpio de material orgánico entre las hileras. El volumen de precipitación que recibe todo el cultivo es similar y la disponibilidad económica del agricultor para la

fertilización, el fertilizante utilizado, la dosis y forma de aplicación es igual para toda la finca.

Drenajes: Los drenajes estudiados presentan un declive similar, 1 m de ancho y una profundidad entre 1-1,5 m. Q2, Q3 y Q4 son drenajes secundarios que se dirigen hacia el drenaje principal Q1 (Fig. 1, Cuadro 1).

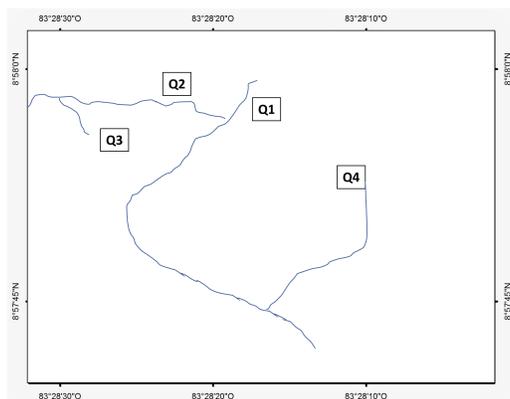


Fig. 1. Ubicación de los drenajes.

Cuadro I. Descripción de los drenajes, suelo y productividad del cultivo por sector.

DRENAJE	DESCRIPCIÓN
Q1	EL drenaje Q1 es una quebrada con origen en el cerro San Miguel, un área boscosa conservada fuera de la finca. Q1 puede contener aportes de nitratos no registrados por lo que se utiliza como control de aleatoriedad. Es el drenaje principal o madre, de caudal mayor a lo largo del año.
Q2	Drenaje secundario ubicado en suelo de clase textural arenosa ¹ . La palma de esta zona es la de menor productividad en la finca.
Q3	Drenaje secundario ubicado en suelo tipo arenoso y arcilloso ¹ . Se observa presencia de sedimentos frescos. Contiene agua de tipo estacional. La palma de esta zona es de mayor productividad que Q2, pero menor al área donde se encuentra Q4.
Q4	Drenaje secundario ubicado en suelo de clase textural arcillosa ¹ . En periodos de lluvias intensas, el área de cultivo donde se encuentra este drenaje se inunda por crecimiento del río Grande de Térraba. La palma de esta zona es la de mayor productividad.

¹ Fig. 1., Cuadro 1 en Anexo 2

Análisis de suelos: Aplicando un muestreo estratificado aleatorio (Sparks, 1996), se tomaron 13 muestras suelo de 1 kg al final del periodo lluvioso (noviembre). Las muestras se obtienen a una profundidad entre 30-40 cm ya que ahí se encuentra la mayoría de las raíces que utilizan los nutrientes (Owen, 1992). Se determinó la composición elemental y la clase textural de este conjunto de muestras. En el siguiente periodo de entrada de lluvias (mayo), se tomaron 6 muestras compuestas distribuidas en las diferentes áreas de suelo identificadas (Cuadros 1 y 2 en Anexo 2). Los análisis tanto de composición como de textura se efectúan en el Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA) con los procedimientos recomendados para suelos con cultivo de palma.

Toma de muestras en los drenajes: Los agricultores usualmente fertilizan en periodos de entrada o salida de lluvias. En el año de monitoreo las lluvias comenzaron en mayo y terminaron al final de noviembre. Hubo un periodo intermedio de merma de lluvias en septiembre. En estos tres periodos el agricultor aplicó fertilizante y se tomaron muestras puntuales de agua para el análisis de nitratos, siempre en el mismo sitio (ubicado con GPS) y entre 10-15 cm debajo del nivel del agua. El agricultor notificó su intención de fertilización y las muestras fueron tomadas entre 2 y 10 días previos y seguidamente posteriores a la actividad de fertilización del cultivo. El número de días fue variable en cada ocasión, sin embargo, esto no afectó la robustez del diseño experimental ya que es un análisis de tendencia, y la toma de la muestra en los cuatro drenajes se realiza el mismo día (igual tiempo transcurrido de procesamiento del fertilizante) y en las mismas condiciones climatológicas. Para control de calidad de la muestra se mide pH y conductividad en el sitio, con un pH metro-conductímetro de campo, marca Metrohm, y electrodos apropiados para el tipo de agua analizada (conductividad y acidez media). Las muestras son llevadas en hielera y en botellas oscuras HPDE al laboratorio donde son filtradas con filtros de nylon, 0,45 μm . La cuantificación de nitratos se realiza por espectrofotometría directa UV, con análisis en flujo continuo. El espectrofotómetro es modelo USB2000 de OceanOptics, y el método utilizado es el validado para el análisis de aguas potables (Hernández-Alpizar & Coy-Herrera, 2015) con modificación por el método de adición estándar para la corrección de interferencias de materia orgánica.

Carga de nitratos: La cantidad de nitratos que transporta cada drenaje se obtiene por estimación de la carga a partir de los datos de concentración y caudal. El caudal de cada drenaje se obtiene por aproximación del área transversal y medición del flujo del agua. El área transversal se estima por sumatoria de segmentos equidistantes de una línea que se traza perpendicular de orilla a orilla en cada drenaje, la distancia de los segmentos es multiplicada por la altura respectiva del agua en cada uno. El flujo (m/s) es obtenido por mediciones repetidas del tiempo que un objeto flotante tarda recorriendo una distancia previamente establecida. La incertidumbre de esta estimación se reduce repitiendo al menos tres veces la medición hasta obtener un valor constante o similar. Con los datos de caudal (m^3/s) y concentración de nitratos (mg/L) se obtiene la carga de nitratos (mg/s) de cada drenaje.

Fertilización: EL agricultor aplica fertilizante granulado y es distribuido por voleado en el área que define la sombra de las hojas más grandes alrededor de la planta. La cantidad varía entre caja llena (1,5 kg) o media caja, y la misma cantidad es aplicada de manera homogénea, de acuerdo con la disponibilidad económica para compra de material y la percepción del agricultor del mejor momento climatológico para la fertilización. El fertilizante es el recomendado y vendido por Palma Tica, S. A. La fórmula contiene: nitrógeno, 11,34%, fósforo, 8%, potasio, 24%, magnesio, 4%, boro, 0,30% y azufre, 3,20%.

Prueba y planteamiento estadístico: Se utiliza la prueba estadística ANOVA para el análisis de variancia de los 4 grupos que conforman los datos de monitoreo de los 4 drenajes, y se utiliza la prueba Tukey para determinar cuál o cuáles grupos hacen la diferencia.

RESULTADOS

La tendencia de la concentración y carga de nitratos en los drenajes se muestra en las figuras 2 y 3, respectivamente. El monitoreo comienza en mayo, 2016, cuando se debilita el fenómeno del niño y dan inicio las lluvias acompañadas de las actividades de fertilización (Fig.2). Hay un primer ciclo de muestreo entre el 25 de mayo (aplicación reciente de fertilizante), 1 y 9 de junio (antes y después de otra fertilización) y un muestreo el 1 de julio, ya con las lluvias establecidas y sin aplicación de fertilizante. En septiembre se presenta un receso en la intensidad de las lluvias que permite realizar otro ciclo de toma de muestras antes y después de la fertilización (12, 20 y 24 septiembre). La última aplicación de fertilizante del año se realiza en noviembre, cuando se debilitan las lluvias, y se toma el último ciclo de muestras (8, 10 y 21 noviembre).

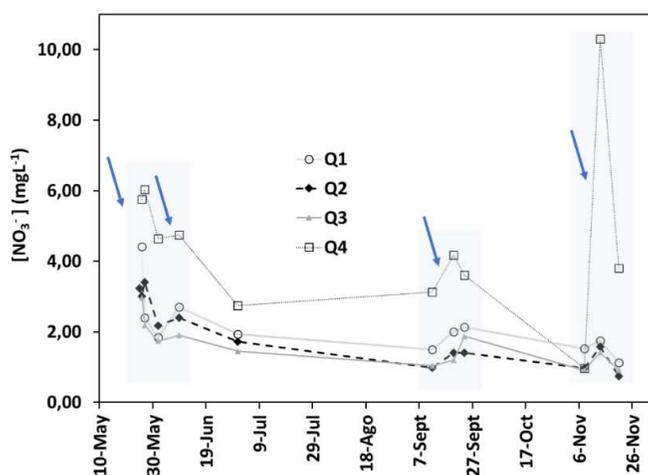


Fig.2. Concentración de nitratos del drenaje primario Q1 y los drenajes secundarios Q2, Q3 y Q4. La toma de muestras es puntual, sin embargo, se unen los puntos para facilitar la visualización de la tendencia. Las flechas señalan días de fertilización de la finca.

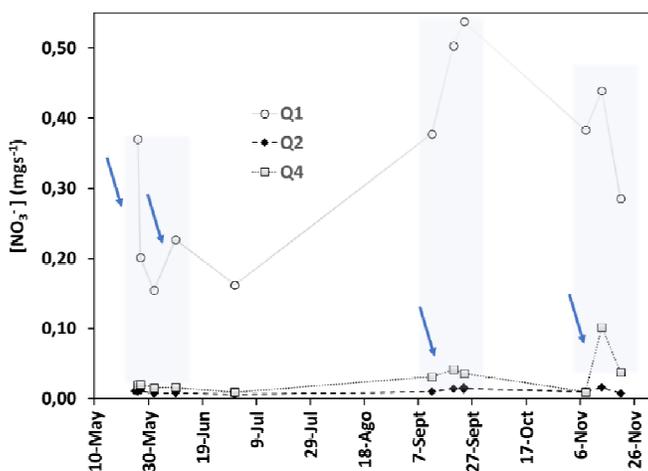


Fig.3. Carga de nitratos (mgs^{-1}) del drenaje primario Q1 y los drenajes secundarios Q2, Q3 y Q4. La toma de muestras es tipo puntual. Se unen los datos con líneas punteadas para facilitar la visualización de la tendencia. Las flechas señalan fertilización de la finca.

Después de cada aplicación de fertilizante se observa un incremento en la concentración de nitratos en los drenajes que decae en los días posteriores. El drenaje Q4 muestra una concentración mayor que los otros drenajes, sobre todo en el periodo intenso de lluvias a final de año. Con un caudal entre 0,1-0,25 m³s⁻¹, la carga de nitratos en el drenaje primario Q1 es considerablemente mayor que en los drenajes secundarios (Fig.3). Los drenajes secundarios tienen un caudal equivalente que oscila con la intensidad de las lluvias entre 0,003-0,01 m³s⁻¹, sin embargo, Q4 presenta en todo el tiempo de monitoreo una carga de nitratos mayor que los otros dos drenajes secundarios.

Los análisis de las muestras de suelos indican una zona de clase textural franco arcillosa que se ubica entre los puntos P2, P7, P12, P13 (Fig.1, Cuadro 1 en Anexo 2). Los drenajes Q2 y Q3, que se encuentran hacia al norte, están ubicados ambos en suelo de clase textural arenosa o franco arenosa. El área del drenaje Q4 es de suelo de clase textural arcillosa y tiene influencia del caudal del río grande de Terraba, con lo que recibe depósito aluvial en periodos de lluvias intensas.

La variación en los drenajes secundarios de la carga de nitratos con respecto al tiempo (primera derivada de la carga de nitratos), muestra diferencias en magnitud y velocidad del cambio. En la figura 4 se muestra el cambio de la carga de nitratos en Q2 y Q4.

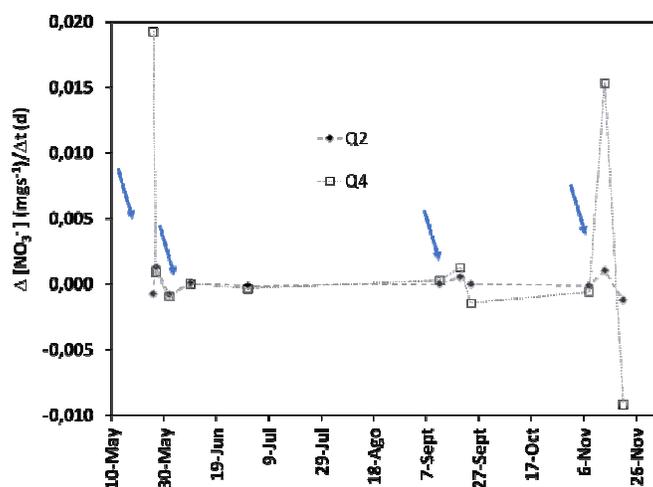


Fig.4. Cambio de la carga de nitratos con respecto al tiempo de muestro de los drenajes secundarios, Q2 (ubicado en suelo clase textural franco arenosa) y Q4 (suelo clase textural arcillosa) de la carga de nitratos con respecto a los resultados del análisis anterior (primera derivada del monitoreo de la carga de nitratos).

La hipótesis nula de esta investigación es que no hay relación entre la carga de nitratos en el agua de los drenajes agrícolas y las diferencias de clase textural del suelo. El análisis estadístico de varianza (ANOVA) de los cuatro diferentes grupos de datos, uno por cada drenaje agrícola y 11 datos por grupo, muestra una probabilidad de 0,000033 al 0,05 de significancia para prueba de la hipótesis nula. Este resultado indica que si hay una diferencia significativa entre los grupos y que la determina al menos una población de los grupos de datos. Se aplica la prueba estadística Tukey (la cual estima la diferencia honestamente significativa) para determinar el grupo estadísticamente diferente. Se obtiene que el grupo de datos del drenaje Q4, ubicado en suelo de clase textural arcillosa, es el estadísticamente diferente.

El análisis elemental de suelo (Cuadro 2 en Anexo 2) indica un suelo fértil con un nivel de contenido elemental y de nutrimentos entre óptimo (adecuado) y medio (suficiente), niveles altos en calcio, hierro y manganeso que se conservan entre el inicio y el final de las lluvias. Se presenta también un bajo porcentaje de materia orgánica en toda el área de la finca.

Ya que la precipitación, la demanda nutricional y edad de la plantación, el día de aplicación, tipo, forma y cantidad aplicada de fertilizante son iguales para toda el área estudiada, en adelante se discuten sólo las variables y procesos que podrían tener una influencia en las diferencias observadas de la tendencia de los nitratos en los drenajes. Estas son la desnitrificación y la nitrificación, la clase textural de suelo, el desarrollo de las raíces de las plantas y la intensidad de la precipitación.

DISCUSIÓN

Los niveles freáticos superficiales reducen la porosidad y el porcentaje de aire del suelo y esto afecta negativamente el rendimiento, el crecimiento de las plantas y su absorción de N, P y K (Peralta-Lobo, Vásquez, Richardson, Alvarado-Hernández, & Bornemisza-Steiner, 1985). La presencia de una tabla de agua alta y fluctuante, la compactación del suelo, y una alta relación de Mg/K y bajo K se ha relacionado con enfermedades, un desarrollo pobre y menos denso de las raíces en plantas jóvenes de palma (Albertazzi & Ramírez, 2009). Sin embargo, en los análisis de nutrimentos del suelo de este estudio no se encuentra las relaciones antes mencionadas y no se registran enfermedades o un pobre desarrollo de las plantas, lo que indica que el suelo se encuentra bien drenado, los drenajes bien construidos y el estado del cultivo es saludable.

La planta de la palma aceitera tiene raíces primarias profundas cerca del tronco y un círculo de raíces de distribución horizontal. En el suelo se encuentra un gradiente creciente de nitrógeno hacia las puntas de las raíces más alejadas la planta. Esta distribución de nitrógeno se asoció con la lixiviación de nitratos por arrastre pluvial (Schroth, Rodrigues, & D'Angelo, 2000). Adicionalmente, las raíces tienen una captación de agua más alta cerca del tallo o tronco central, ligeramente inferior en los extremos de las raíces horizontales y más baja en los caminos entre las hileras del cultivo, tanto en suelos arcillosos como arenosos (Nelson et al., 2014).

Junto al arrastre pluvial, y debido a la alta solubilidad de los nitratos en agua, las diferencias en la capacidad de captación de agua pueden contribuir a explicar la distribución horizontal del nitrógeno en gradiente creciente alrededor de la planta. Sin embargo, un factor relevante para explicar las altas concentraciones de nitratos (con respecto a los otros drenajes) encontradas en el drenaje de suelo de clase textural arcillosa (Fig.2) es la distribución vertical de la actividad de las raíces horizontales en relación con el tipo de suelo. La captación de agua y el desarrollo de las raíces de la palma está más cerca de la superficie en suelos arcillosos que en suelos arenosos (Nelson et al., 2014). Esta actividad más superficial implica que en suelo arcilloso, los procesos de asimilación de nitratos de la planta, así como la nitrificación (que es un proceso aeróbico de las capas superficiales del suelo) ocurren antes que la desnitrificación, ya que esta sucede en ambientes anaeróbicos del suelo a mayor profundidad. La menor infiltración y mayor compactación que presentan los suelos de partícula más finas como los de clase textural arcillosa no permiten la infiltración y desnitrificación en capas profundas del suelo. Por otra parte, los suelos arcillosos con

alto contenido de Ca tienen una mayor capacidad de retención de la materia orgánica que los suelos arenosos (Oades, 1988). El carbón es un elemento necesario para la desnitrificación bacteriana, pero estabilizado por el suelo se convierte en un elemento no disponible para la mineralización y la desnitrificación (Castellano, Kaye, Lin, & Schmidt, 2012). Se observa poca materia orgánica y una relación C/N baja en toda la finca, particularmente baja en las zonas de suelo de clase textural franco arcillosa, condiciones que no promueven la desnitrificación (Cleveland & Liptzin, 2007; Olivares et al., 2013).

Finalmente, las distintas velocidades con que cambia la carga de nitratos en los drenajes Q2 y Q4 entre días de toma de muestra (primera derivada del monitoreo de carga de nitratos), evidencia el distinto procesamiento de los nitratos por el suelo y la planta en las zonas respectivas. En ambos casos, los cambios positivos suceden cuando se dan eventos de fertilización, sin embargo, la magnitud de la velocidad con que cambia la carga de nitratos del drenaje de suelo clase textural arcillosa es superior a la arenosa, tanto en el momento de aplicación de fertilizante al inicio de las lluvias, como en la temporada intermedia y al final de la época lluviosa. Esto comprueba el proceso superficial de los nitratos en el suelo de clase textural franco arcillosa. Por otro lado, la velocidad con que disminuye la carga de nitratos, después del aumento inicial con la fertilización, es mucho más marcada en el drenaje de suelo de clase textural arcillosa que en el drenaje ubicado en suelo de clase textural arenosa, lo cual demuestra un gran arrastre pluvial y superficial de los nitratos en el drenaje de suelo clase textural arcillosa de alta impermeabilidad.

AGRADECIMIENTOS

La autora agradece a los colegas que participaron en esta investigación, a la Vicerrectoría de Investigación del Tecnológico de Costa Rica y a CONARE por el financiamiento para realizarla, y también agradece a los compañeros del grupo PIPAL que ejecutó el proyecto “Tendencias, riesgos e impactos asociados al cultivo de la palma aceitera (*Elaeis guineensis* Jacq.) en el Pacífico Sur, como insumo para la previsión de prácticas y políticas que promuevan una producción sustentable y segura en Costa Rica (PIPAL-Sur)”, por el trabajo amplio e integral realizado en la zona del cantón de Osa, y del cual forma parte el objetivo detallado de la presente investigación.

REFERENCIAS

- Addiscott, T. M. (1996). Measuring and modelling nitrogen leaching: parallel problems. *Plant and Soil*, 181, 1–6. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1007/BF00011284>
- Albertazzi, H., & Ramírez, C. (2009). Soil characteristics and root development in young oil palms (*Elaeis guineensis* Jacq.) planted in sites affected by bud rots (pudrición del cogollo). *ASD Oil Palm Papers*, 33, 1-14.
- Alvarado, A., Mata, R., & Chinchilla, M. (2014). Arcillas identificadas en suelos de Costa Rica a nivel generalizado durante el período 1931-2014: I. Historia, metodología de análisis y mineralogía de arcillas en suelos derivados de cenizas volcánicas. *Agronomía costarricense: Revista de ciencias agrícolas*, 38(1), 76-106.
- Annandale, J. G., Preez, C. C. du, Stirzaker, R. J., Thorburn, P. J., Bristow, K. L., & van der Laan, M. (2013). Modelling nitrogen leaching: Are we getting the right answer for the right reason? *Agricultural Water Management*, 133, 74–80. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.10.017>
- Boons, F., & Mendoza, A. (2010). Constructing sustainable palm oil: How actors define sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 18(16–17), 1686–1695. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.07.003>
- Castellano, M. J., Kaye, J. P., Lin, H., & Schmidt, J. P. (2012). Linking carbon saturation concepts to nitrogen saturation and retention. *Ecosystems*, 15(2), 175-187.
- Cleveland, C. C., & Liptzin, D. (2007). C: N: P stoichiometry in soil: is there a “Redfield ratio” for the microbial biomass? *Biogeochemistry*, 85(3), 235-252.
- Colchester, M., Chao, S., Fon Achobang, C., Alaza, L., Ale, N., Anderson, P., ... Priyani Widjaya, A. (2013). *The Oil Palm Sector at a Crossroads Conflict or Consent*. Retrieved from <http://www.forestpeoples.org/sites/fpp/files/publication/2013/11/conflict-or-consentenglishlowres.pdf>
- Cunha, E. J., De Assis Montag, L. F., & Juen, L. (2015). Oil palm crops effects on environmental integrity of Amazonian streams and Heteropteran (Hemiptera) species diversity. *Ecological Indicators*, 52, 422–429. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.12.024>
- Dislich, C., Keyel, A. C., Salecker, J., Kisel, Y., Meyer, K. M., Auliya, M., ... Wiegand, K. (2017). A review of the ecosystem functions in oil palm plantations, using forests as a reference system. *Biological Reviews*, 92(3), 1539–1569. <https://doi.org/10.1111/brv.12295>
- Dubos, B., Snoeck, D., & Flori, A. (2017). Excessive use of fertilizer can increase leaching processes and modify soil reserves in two ecuadorian oil palm plantations. *Experimental Agriculture*, 53(2), 255–268. <https://doi.org/10.1017/S0014479716000363>
- Duran, N., & Ortiz, R. (1995). Efecto de algunas propiedades físicas del suelo y la precipitación sobre la producción de la palma aceitera (*Elaeis guineensis*) en Centroamérica. *Agronomía Mesoamericana*, 6, 7-14., 7–14. <https://doi.org/10.15517/AM.V6I0.24802>
- Fowler, D., Coyle, M., Skiba, U., Sutton, M. A., Cape, J. N., Reis, S., ... Amann, M. (2013). The global nitrogen cycle in the twenty-first century The global nitrogen cycle in the twenty- first century. <https://doi.org/dx.doi.org/10.1098/rstb.2013.0164>

- Gallmetzer, N., & Schulze, C. H. (2015). Impact of oil palm agriculture on understory amphibians and reptiles: A Mesoamerican perspective. *Global Ecology and Conservation*, 4, 95–109. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2015.05.008>
- Galloway, J. N., Townsend, A. R., Erisman, J. W., Bekunda, M., Cai, Z., Freney, J. R., ... Sutton, M. A. (2008). Transformation of the nitrogen cycle: Recent trends, questions, and potential solutions. *Science*, 320(5878), 889–892. <https://doi.org/10.1126/science.1136674>
- Hernández-Alpízar, L., & Coy-Herrera, R. (2015). Cuantificación de nitratos en agua potable para análisis en línea. *Tecnología en Marcha*. 28, 86–93.
- Instituto Nacional de Estadística y Censos (2015). VI Censo Nacional Agropecuario: Resultados Generales. 1 ed. San José. Costa Rica.
- Hoffmann, M. P., Donough, C. R., Cook, S. E., Fisher, M. J., Lim, C. H., Lim, Y. L., ... Oberthür, T. (2017). Yield gap analysis in oil palm: Framework development and application in commercial operations in Southeast Asia. *Agricultural Systems*, 151, 12–19. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.11.005>
- Khatun, R., Reza, M. I. H., Moniruzzaman, M., & Yaakob, Z. (2017). Sustainable oil palm industry: The possibilities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76(August 2016), 608–619. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.077>
- Konopik, O., Gray, C. L., Grafe, T. U., Steffan-Dewenter, I., & Fayle, T. M. (2014). From rainforest to oil palm plantations: Shifts in predator population and prey communities, but resistant interactions. *Global Ecology and Conservation*, 2, 385–394. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2014.10.011>
- Nainar, A., Chey, V. K., Aldridge, D. C., Walsh, R. P. D., Foster, W. A., Reynolds, G., ... Bidin, K. (2016). The effects of catchment and riparian forest quality on stream environmental conditions across a tropical rainforest and oil palm landscape in Malaysian Borneo. *Ecohydrology*, 10(4), e1827. <https://doi.org/10.1002/eco.1827>
- Nelson, P. N., Webb, M. J., Banabas, M., Nake, S., Goodrick, I., Gordon, J., ... Dubos, B. (2014). Methods to account for tree-scale variability in soil- and plant-related parameters in oil palm plantations. *Plant and Soil*, 374(1–2), 459–471. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1894-7>
- Olivares, J., Bedmar, E. J., & Sanjuán, J. (2013). Biological Nitrogen Fixation in the Context of Global Change. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 26(5), 486–494. <https://doi.org/10.1094/MPMI-12-12-0293-CR>
- Owens, P. R., Whisler, F. D., Jenkins, J. N., Thomasson, J. A., & Iqbal, J. (2005). Spatial Variability Analysis of Soil Physical Properties of Alluvial Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 69(4), 1338. <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.0154>
- Oades, J. M. (1988). The retention of organic matter in soils. *Biogeochemistry*, 5(1), 35–70.
- Pardon, L., Bockstaller, C., Marichal, R., Sionita, R., Nelson, P., Gabrielle, B., ... Bessou, C. (2016). Modelling potential nitrogen losses in oil palm plantations with IN-Palm, an agri-environmental indicator. *Environmental Modelling and Software for Supporting a Sustainable Future*, 445–552. Retrieved from <http://www.iemss.org/society/index.php/iemss-2016-proceedings>
- Pardon, L., Ian Huth, N., Netelenbos Nelson, P., Banabas, M., Gabrielle, B., & Bessou, C. (2017). Yield and nitrogen losses in oil palm plantations: Main drivers and management trade-offs determined using simulation. *Field Crops Research*, 210(May), 20–32. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.05.016>

- Peralta-Lobo, F., Vásquez, O., Richardson, D. L., Alvarado-Hernández, A., & Bornemisza-Steiner, E. (1985). Effect of some soil physical characteristics on yield, growth and nutrition of the oil palm in Costa Rica. Effet de quelques caractéristiques physiques du sol sur le rendement, la croissance et la nutrition du palmier a huile au Costa Rica. *Oléagineux*, 40(8/9), 423-430.
- Pirker, J., Mosnier, A., Kraxner, F., Havlík, P., & Obersteiner, M. (2016). What are the limits to oil palm expansion? *Global Environmental Change*, 40, 73–81. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.06.007>
- Reza, S. K., Nayak, D. C., Chattopadhyay, T., Mukhopadhyay, S., Singh, S. K., & Srinivasan, R. (2016). Spatial distribution of soil physical properties of alluvial soils: a geostatistical approach. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 62(7), 972–981. <https://doi.org/10.1080/03650340.2015.1107678>
- Rist, L., Feintrenie, L., & Levang, P. (2010). The livelihood impacts of oil palm: Smallholders in Indonesia. *Biodiversity and Conservation*, 19(4), 1009–1024. <https://doi.org/10.1007/s10531-010-9815-z>
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin III, F. S., Lambin, E. F., ... & Nykvist, B. (2009). A safe operating space for humanity. *Nature*, 461(7263), 472.
- Román-Forastelli, M., Angulo-Aguilar, J.E. (2013). Panorama socioeconómico de los cantones de Osa y Golfito: tendencias y desafíos para el desarrollo sostenible. Iniciativa Osa y Golfito. INOGO, Stanford Woods Institute for the Environment. Stanford University.
- Schroth, G., Rodrigues, M. R. L., & D'Angelo, S. a. (2000). Spatial patterns of nitrogen mineralization, fertilizer distribution and roots explain nitrate leaching from mature Amazonian oil palm plantation. *Soil Use and Management*, 16(3), 222–229. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2000.tb00197.x>
- SEPSA. (2016). Boletín Estadístico 2016. *Boletín Estadístico Agropecuario*, 26. Retrieved from <http://www.infoagro.go.cr/BEA/BEA26/BEA26.pdf>
- Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S. E., Fetzer, I., Bennett, E. M., ... & Folke, C. (2015). Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science*, 347(6223), 1259855.
- Solano, J., & Villalobos, R. (2000). Regiones y subregiones climáticas de Costa Rica. San José, Costa Rica: Instituto Meteorológico Nacional.
- United States Department of Agriculture (USDA). (2017). World Agricultural Production. *Circular Series*. Retrieved from <http://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/production.pdf>
- Van der Laan, M., Stirzaker, R. J., Annandale, J. G., Bristow, K. L., & Preez, C. C. d. (2010). Monitoring and modelling draining and resident soil water nitrate concentrations to estimate leaching losses. *Agricultural Water Management*, 97(11), 1779–1786. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.06.012>
- Walsh, R. P. D., Nainar, A., Bidin, K., Higton, S., Annammala, K. V, Blake, W., ... Hanapi, J. (2016). Hydrogeomorphological and water quality impacts of oil palm conversion and logging in Sabah, Malaysian Borneo: a multi-catchment approach. *Geophysical Research Abstracts*, 18(4), EGU2016-18195.
- Woittiez, L. S., van Wijk, M. T., Slingerland, M., van Noordwijk, M., & Giller, K. E. (2017). Yield gaps in oil palm: A quantitative review of contributing factors. *European Journal of Agronomy*, 83, 57–77. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.11.002>

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El mayor contenido de nitratos en el drenaje de áreas de clase textural arcillosa y suelo aluvial, la captación y asimilación superficial de los nitratos adicionados con el fertilizante, la nitrificación como posible proceso dominante y superficial en suelos arcillosos, junto con los aportes eventuales de nutrimentos por depósito aluvial, explican la observación de un mayor crecimiento y rendimiento de las plantas en estas zonas de suelo, así como su impermeabilidad se relaciona directamente con el rápido decrecimiento de la carga de nitratos con el lavado pluvial en comparación con lo que sucede en el drenaje en suelos de clase textural arenosa. Por su relación con los procesos del suelo y la planta, se recomienda el monitoreo de nitratos en los drenajes para la toma de decisiones en la gestión del fertilizante.

Como ejemplos de aplicación, una alta carga de nitratos en un drenaje está relacionada con un suelo saturado, con desarrollo y captación superficial o un fuerte arrastre pluvial, lo que indicaría la recomendación de reducción en la cantidad o dosis de fertilización o bien su aplicación en condiciones menos lluviosas. Por el contrario, una baja carga de nitratos puede llevar a decidir la aplicación inmediata de fertilizante o su aplicación con el inicio de las lluvias.

De manera que la información de un monitoreo de nitratos en los drenajes puede ser utilizada para la gestión de la fertilización, siempre que se consideren las condiciones en que se desarrolla esta investigación (forma de fertilización homogénea, condiciones óptimas de nutrición, buen desarrollo y rendimiento de las plantas, buen drenaje, humedad y actividad adecuada de las raíces). Es importante la consideración de esta indicación, ya que la necesidad de aplicación o dosificación de fertilizante en este estudio no se enfoca en el requerimiento particular de nutrimentos, sino en la gestión del fertilizante y parte de condiciones óptimas. Se requieren estudios con diferentes protocolos de frecuencia, momento y dosis que sean indicadores del efecto preciso de estos cambios sobre la nutrición de la planta.

Ya que puede contribuir a una mejor administración del fertilizante, evitar impactos innecesarios ambientales, así como producir un ahorro económico, el monitoreo de nitratos en drenajes superficiales agrícolas de cultivos de palma se suma a las herramientas para la gestión y desarrollo sostenible del cultivo.

ANEXO 1: Adjunto

CARTA DE RECEPCIÓN DE LA REVISTA CIENTÍFICA: CUADERNOS DE INVESTIGACIÓN UNED



Jueves 20 de junio del 2019

10-2019

A QUIEN INTERESE

Nos complace informarle que hemos recibido el manuscrito: *“Monitoreo de nitratos en los drenajes de palma aceitera (Elaeis guineensis): una herramienta para la sostenibilidad del cultivo”* por Laura Hernández Alpizar, Jesús Mora Molina y Ricardo Coy Herrera, con el fin de ser valorado para su posible publicación en la revista Cuadernos de Investigación UNED.

Atentamente,



J. Monge-Nájera

Editor

ANEXO 2: Descripción del suelo

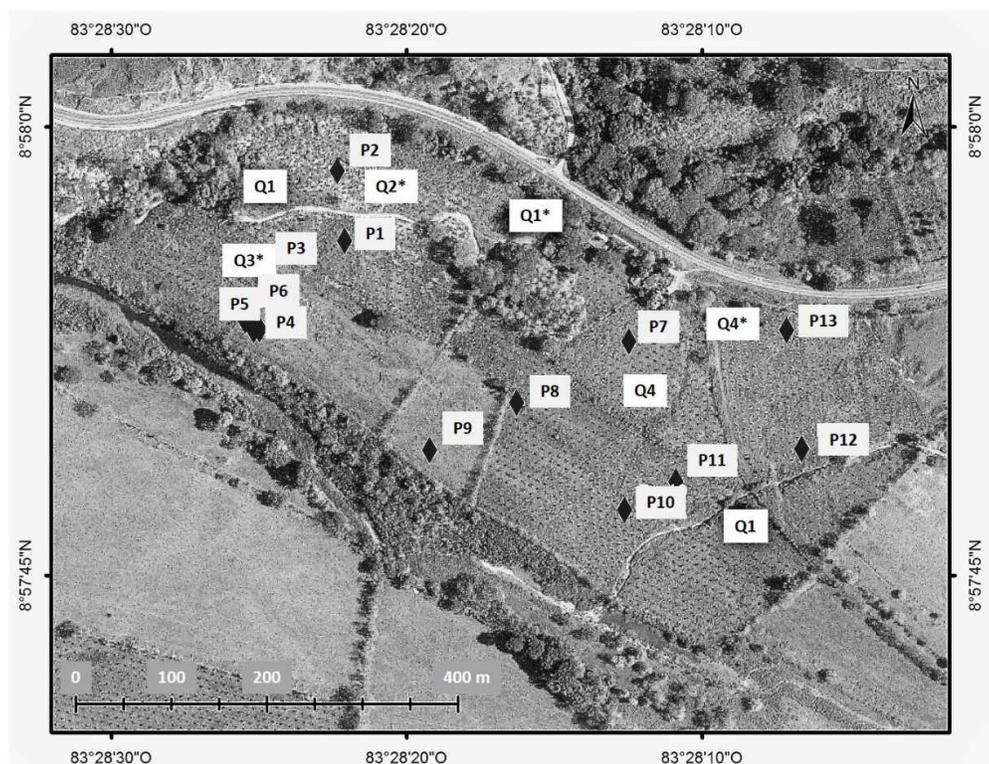


Fig.1. Sitios de toma de muestra de suelo (P#) y drenajes (Q#*).

Cuadro 1. Clase textural de las muestras tomadas en el suelo de la finca analizada*

Muestra	Clase Textural (%)			Clase Textural
	ARENA	LIMO	ARCILLA	
P-1	82	8	10	ARENA FRANCA
P-2	28	44	28	FRANCO ARCILLOSA
P-3	64	18	18	FRANCO ARENOSA
P-4	77	13	10	FRANCO ARENOSA
P-5	58	32	10	FRANCO ARENOSA
P-6	77	15	8	FRANCO ARENOSA
P-7	23	42	35	FRANCO ARCILLOSA
P-8	87	5	8	ARENA FRANCA
P-9	92	3	5	ARENOSA
P-10	59	28	13	FRANCO ARENOSA
P-11	64	23	13	FRANCO ARENOSA
P-12	28	34	38	FRANCO ARCILLOSA
P-13	64	13	23	FRANCO ARCILLOSA ARENOSA

*Análisis reportados con el procedimiento CIA-SC09-03-P02 "Determinación de Textura en Suelos por el Método del Hidrómetro de Bouyoucos". (Centro de Investigaciones agronómicas, Universidad de Costa Rica).

Cuadro 2. Composición elemental de las muestras de suelo tomadas al final e inicio de las lluvias (noviembre y mayo, respectivamente) *.

Final de Lluvias												
Muestra	pH H ₂ O	cmol(+)/L					% SA	mg/L				
		ACIDEZ 0,5	Ca 4	Mg 1	K 0,3	CICE 5		P	Zn	Cu	Fe	Mn
P-1	6,8	0,16	20,64	1,72	0,22	22,74	0,7	15	1,9	4	234	72
P-2	7,9	0,12	32,30	2,38	0,27	35,07	0,3	10	2,7	11	274	104
P-3	7,2	0,10	24,07	1,81	0,22	26,20	0,4	8	2,3	7	241	138
P-4	8,2	0,07	32,49	1,76	0,23	34,55	0,2	9	3,0	6	268	206
P-5	8,3	0,08	31,70	1,41	0,21	33,40	0,2	10	2,9	5	273	179
P-6	8,2	0,08	31,95	1,29	0,22	33,54	0,2	9	3,0	5	321	175
P-7	6,6	0,20	27,60	3,51	0,22	31,53	0,6	8	1,2	8	235	62
P-8	7,8	0,07	25,42	0,99	0,24	26,72	0,3	14	2,7	5	300	141
P-9	8,4	0,07	30,57	2,13	0,28	33,05	0,2	12	2,8	4	229	121
P-10	7,3	0,09	26,99	2,00	0,23	29,31	0,3	14	2,7	8	263	105
P-11	6,5	0,17	20,27	2,01	0,52	22,97	0,7	11	1,6	7	292	69
P-12	6,6	0,12	31,02	2,63	0,23	34,00	0,4	11	2,0	10	235	107
P-13	6,9	0,14	29,71	1,84	0,35	32,04	0,4	16	1,5	5	249	71
PROMEDIO	7 óptimo	0,11 óptimo	28 alto	2 medio	0,3 medio	30	0,4 óptimo	11 bajo	2 medio	7 óptimo	263 alto	119 alto

Final de Lluvias										
Muestra	mg/L S	RELACIONES CATIONICAS				mS/cm CE 1,5	%		C/N	% MO
		Ca/Mg 2-5	Ca/K 5-25	Mg/K 2,5-15	(Ca+Mg)/K 0-40		C	N		
P-1	43	12,0	93,8	7,8	101,6	0,1	0,23	0,02	11,5	0,33
P-2	64	13,6	119,6	8,8	128,4	0,1	0,76	0,11	6,9	1,09
P-3	51	13,3	109,4	8,2	117,6	0,1	0,50	0,06	8,3	0,72
P-4	67	18,5	141,3	7,7	148,9	0,1	0,35	0,03	11,7	0,50
P-5	65	22,5	151,0	6,7	157,7	0,1	0,28	0,03	9,3	0,40
P-6	66	24,8	145,2	5,9	151,1	0,1	0,29	0,03	9,7	0,41
P-7	57	7,9	125,5	16,0	141,4	0,1	0,82	0,12	6,8	1,17
P-8	55	25,7	105,9	4,1	110,0	0,1	0,35	0,04	8,8	0,50
P-9	64	14,4	109,2	7,6	116,8	0,1	0,34	0,04	8,5	0,49
P-10	54	13,5	117,3	8,7	126,0	0,1	0,69	0,09	7,7	0,99
P-11	42	10,1	39,0	3,9	42,8	<0,1	0,46	0,07	6,6	0,66
P-12	60	11,8	134,9	11,4	146,3	0,1	1,10	0,15	7,3	1,57
P-13	58	16,1	84,9	5,3	90,1	<0,1	0,57	0,08	7,1	0,82
PROMEDIO	57 óptimo	16 alto	114 alto	8 óptimo	121 alto	0,1	0,52	0,07	8,5	0,7 Bajo

Inicio de Lluvias												
Muestra	pH H ₂ O	cmol(+)/L					% SA	mg/L				
		ACIDEZ 0,5	Ca 4	Mg 1	K 0,3	CICE 5		P	Zn	Cu	Fe	Mn
D-1	6,5	0,14	25,19	1,68	0,25	27,26	0,5	7	2,4	9	236	110
D-2	7,5	0,10	24,08	1,24	0,17	25,59	0,4	7	2,7	8	237	179
D-3	7,4	0,11	26,04	1,33	0,18	27,66	0,4	7	2,5	10	277	162
D-4	5,9	0,37	18,04	2,71	0,55	21,67	2	16	1,7	7	290	54
D-5	6,7	0,16	28,81	2,51	0,91	32,39	0,5	53	1,8	7	332	61
D-6	5,9	0,56	22,23	3,65	0,35	26,79	2	11	1,2	6	241	42
PROMEDIO	6,7 óptimo	0,24 óptimo	24 alto	2 medio	0,4 medio	27	0,9 óptimo	17 medio	2 medio	8 óptimo	269 alto	101 alto

Inicio de Lluvias										
Muestra	mg/L S	RELACIONES CATIONICAS				mS/cm CE 1,5	%		C/N	% MO
		Ca/Mg 2-5	Ca/K 5-25	Mg/K 2,5-15	(Ca+Mg)/K 0-40		C	N		
D-1	52	15,0	100,8	6,7	107	0,1	1,40	0,17	8,2	2,00
D-2	51	19,4	141,6	7,3	149	0,1	0,81	0,09	9,0	1,16
D-3	52	19,6	144,7	7,4	152	0,2	0,93	0,10	9,3	1,33
D-4	35	6,7	32,8	4,9	38	0,1	0,79	0,10	7,9	1,13
D-5	55	11,5	31,7	2,8	34	0,1	1,14	0,15	7,6	1,63
D-6	41	6,1	63,5	10,4	74	0,1	0,94	0,14	6,7	1,34
PROMEDIO	48 óptimo	13 alto	86 alto	7 óptimo	92 alto	0,1	1,00	0,13	8,1	1,4 Bajo

*Molina, E., & Meléndez, G. (2002). Tabla de interpretación de análisis de suelos. Universidad de Costa Rica, Centro de Investigación Agronómicas. San José. Resultados reportados con los análisis: pH en agua 10:25; Acidez y Al extraídos con KCl 1M 1:10, Ca, Mg, K, P, Zn, Fe, Mn, Cu y S con Mehlich 3 pH 2,5 (HOAc 0,2N, NH₄NO₃ 0,25N, NH₄F 0,015N, HNO₃ 0,013N, EDTA 0,001M). Acidez determinada por valoración con NaOH y Al con HCl. El resto de los elementos por Espectrometría de Emisión Atómica con Plasma (ICP). (Centro de Investigaciones agronómicas, Universidad de Costa Rica).