



Universidad de Matanzas Sede “Camilo  
Cienfuegos”

Facultad de Ciencias Agropecuarias

---



# **Análisis espacial del fósforo asimilable del suelo para la sostenibilidad del agrosistema azucarero**

**Tesis presentada en opción al Título Académico de  
Máster en Ciencias Agrícolas**

**Mención en Sistemas Agroecológicos y Sostenibles de  
Producción**

**Autor:** Ing. Yavay Sánchez Estenoz

**Tutor (es):** MSc. José Cirilo Acosta

**2021**

**Pensamiento**

*“Considero más valiente al que conquista sus deseos que al que conquista a sus enemigos, ya que la victoria más dura es la victoria sobre uno mismo”.*

*Aristóteles*

## ***Dedicatoria***

***A mi familia y en especial mi hijo, padres, mi hermana, mi esposa y abuelos que son mi mayor estímulo para continuar superándome.***

## **Agradecimientos**

*En primer lugar a mí querida familia: hijo, padres, abuelos, a mis hermanas Daniela y Melisa, mi madrina Anna Kuball, que desde posiciones diferentes me brindaron comprensión, seguridad y confianza para que todo concluyera exitosamente.*

*A mis amigos Mirita y Yasmany por brindarme su apoyo incondicional y ser ejemplos de optimismo y constancia, por estar presente en cada momento que los necesité. Mi deuda de gratitud hacia los dos, será eterna. Le doy gracias a Dios por tenerlos como amigos.*

*A Yanay por el impulso y la confianza que depositó en mí.*

*A mis profesores por darme la posibilidad de adquirir un mayor nivel científico y profesional.*

*A mis amigos de batalla y compañeros de estudio, en especial a Lucy, por la solidaridad que me ha brindado y por ser esa luciérnaga que alumbró siempre mi camino.*

*A todos los que impulsaron mi sueño y confiaron en mí.*

*Muchas Gracias*

## **Opinión del Tutor**

El trabajo titulado “Análisis espacial del fósforo asimilable del suelo para la sostenibilidad del proceso de soporte en el agrosistema azucarero” desarrollado por el Ing. Yavay Sánchez Estenoz, como requisito parcial para optar por el Título Académico de Máster en Ciencias Agrícolas; en Mención en Sistemas Agroecológicos y Sostenibles de Producción, cumple cabalmente con los objetivos y tareas propuestas.

La Búsqueda Bibliográfica realizada es actualizada. El uso de la Internet es un 94% del total. La Literatura Inglesa consultada representa el 69%, de la bibliografía. El 34% de las 109 referencias bibliográficas es de los últimos 5 años y el 79% de la última década. El 100% de la Bibliografía aparece citada en el cuerpo del trabajo. El tema abordado es de actualidad, pues el análisis de procesos de soporte es vital para la cuantificación de costos, beneficios y riesgos para los servicios ecosistémicos; pues la evaluación de estados y tendencias al cambio puede contribuir al establecimiento de las estrategias necesarias para un menor impacto ambiental. Aspectos de gran importancia en nuestro país, debido a la concepción de sitios específicos necesarios para una agricultura de precisión que promueve un uso más eficiente de los recursos. El trabajo desarrollado tiene gran aplicabilidad práctica, pues a partir de los muestreos de suelo georreferenciados y el uso de la geoestadística es posible predecir valores de propiedades del suelo en sitios no muestreados con alto rigor científicos y proporcionar informaciones confiable a la hora de tomar decisiones sobre el manejo de fertilizantes.

Se han cumplido las normas para el desarrollo de esta investigación y el documento final presenta muy buena calidad de impresión, sin errores ortográficos ni de redacción.

El maestrante, Ing. Yavay Sánchez Estenoz, ha mostrado conocimientos suficientes en el desarrollo de esta investigación, con un alto grado de compromiso y creatividad. En todo momento ha trabajado con seriedad y elevado rigor científico en la solución de las tareas de su investigación. Basado en lo antes expuesto, consideramos que el trabajo presentado puede ser aceptado como requisito para optar por el título de Máster en Ciencias Agrícolas. Para que así conste firmamos la presente a los 8 días del mes de diciembre de 2021.

---

MSc. José Cirilo Acosta  
Tutor

## Resumen

El aumento de la producción de caña de azúcar comienza con los procesos de soporte, determinados por las propiedades del suelo. El trabajo en su totalidad analiza las variabilidades espaciales del fósforo asimilable del suelo como elemento básico para la precisión en la agricultura y poder contribuir a la sostenibilidad del agrosistema azucarero. El estudio se localiza entre las coordenadas 22° 25' 42" N a 22° 29' 39" N y 80° 57' 22" O a 80° 52' 43" O, sobre un suelo *Ferralsol*, perteneciente a la provincia Matanzas, Cuba. El agrosistema azucarero se compone de 74 unidades mínimas de manejos, que abarcan 1261,41 ha. Se seleccionó el modelo exponencial para el ajuste del semivariograma, donde se obtuvo un rango de 237,07 metros. Para la predicción espacial se consideró el modelo de *Kriging* Ordinario y se demostró que el fósforo asimilable del suelo presentó variabilidad espacial en el área evaluada, lo que permitió identificar diferentes sitios específicos para el manejo de fertilizantes, incluso, dentro de los campos de caña de azúcar. Además se identificaron conflictos espaciales asociados a aplicaciones en exceso y déficit, lo que ocasiona impactos económicos y ambientales.

**Abstract**

*The sugarcane growth starts with support process, determined by soil properties. This study researches and predicts the spatial variability of soil available phosphorus as basic element for accuracy in agriculture and to contribute at sustainable sugarcane agrosystem. It is located between 22° 25' 42" N to 22° 29' 39" N and 80° 57' 22" W to 80° 52' 43" W coordinates, on Ferralsol soil, at Matanzas county, Cuba. The sugarcane agrosystem is constituted for 74 fields, that include 1261, 41 ha. It was chose exponential model for adjust of semivariograma, where did we obtain a range of 237, 07 meters. For spatial prediction we used the Ordinary Kriging and it was showed spatial variability of soil available phosphorus in evaluated area, that it identified specific sites in sugarcane fields for fertilization management. Moreover, it was identified spatial tradeoff associated with excessive or deficient applications, that it causes economic and environmental impacts.*

## **Glosario de términos**

**Agrosistema:** Sistema constituido por explotaciones agrarias, donde se persigue la obtención de mayores rendimientos del cultivo

**Bloque:** Área que comprende varios campos de caña de azúcar

**Cepa:** Denominación para distintos períodos por los que transita el cultivo de la caña de azúcar desde su plantación hasta su demolición.

**Conflictos espaciales:** Situaciones reales que causan algún tipo de perjuicio en algunos sitios, como consecuencia de manejos realizados en el agrosistema, con la finalidad de obtener beneficios económicos

**Estructuras:** Forma de agrupación de las partículas que componen el suelo. Se refiere a las características del agrosistema, es decir, a sus propiedades.

**Funciones:** En el agrosistema se producen como resultado de las propiedades del suelo y de la interacción de las mismas, que permiten la ocurrencia de procesos indispensables para la existencia de los servicios ecosistémicos

**Geoestadística:** Análisis estadístico de la variable donde se incorpora la dimensión espacial

**Procesos:** Serie escalonada de operaciones, como resultado de la interacción de las estructuras y otros factores (naturales y antrópicos) en el agrosistema

**Semivariograma:** Gráfico que se obtiene del análisis estructural de la variable y que ofrece los parámetros necesarios para la predicción espacial

**Sitios específicos:** Zonas identificadas en el agrosistema, que se diferencian en categorías del nutriente del suelo y que requieren manejos de fertilización diferenciados

**Sostenibilidad:** Mantenimiento en el tiempo de las estructuras, procesos y funciones en el agrosistema, de manera que se garantice la provisión de los diferentes servicios ecosistémicos a la sociedad, a lo largo del tiempo

**Unidad mínima de manejo (UMM):** Campo para el cual se realizan las recomendaciones de fertilizantes en el cultivo de la caña de azúcar.

**Variabilidad espacial:** Distribución natural de una propiedad del suelo en el espacio



## Índice

1. Introducción.....	1
2. Revisión bibliográfica. ....	4
2.1 Fundamentos teóricos-prácticos de la Investigación. ....	4
2.2 Servicios ecosistémicos.....	4
2.2.1 Clasificación de los servicios ecosistémicos. ....	5
2.3 Servicios ecosistémicos del suelo. ....	7
2.3.1 Aspectos espacio – temporales de los servicios ecosistémicos.....	7
2.4 Procesos de soporte y servicios ecosistémicos en el agrosistema de la caña de azúcar. ....	9
2.4.1 Fósforo asimilable del suelo como indicador biofísico de procesos de soporte y servicios ecosistémicos. ....	11
2.5 Metodologías para evaluar servicios ecosistémicos en agrosistemas... ..	12
2.5.1 Geoestadística como herramienta para evaluar procesos de soporte y servicios ecosistémicos. ....	15
3. Materiales y Métodos. ....	16
3.1 Descripción del área de estudio.....	16
3.1.1 Comportamiento de variables climáticas.....	17
3.2 Recopilación de los datos. ....	17
3.2.1 Georreferenciación.....	17
3.2.2 Muestreo de suelo e identificación de muestras. ....	18
3.2.3 Determinaciones analíticas. ....	19
3.3 Análisis exploratorio de los datos. ....	20
3.3.1 Normalidad de los datos.....	21
3.3.2 Análisis de tendencias y mapa de distribución por categorías de fósforo asimilable del suelo. ....	22
3.4 Análisis estructural de los datos. ....	22
3.4.1 Estimación del semivariograma experimental. ....	23
3.4.2 Ajuste de los datos. ....	24

3.4.3 Predicción espacial del fósforo asimilable del suelo como indicador de procesos de soporte y servicios ecosistémicos.....	25
3.4.4 Validación cruzada.....	26
3.5 Análisis de conflictos en el agrosistema azucarero. ....	27
4. Resultados y Discusión. ....	28
4.1 Análisis exploratorio de los datos de fósforo asimilable del suelo. ....	28
4.1.1 Normalidad de los datos.....	29
4.1.2 Análisis de tendencias.....	30
4.2 Análisis estructural de los datos de fósforo asimilable del suelo. ....	31
4.2.1 Ajuste de modelos para la obtención del semivariograma experimental.....	32
4.2.2 Predicción espacial del fósforo asimilable del suelo en el agrosistema azucarero. ....	34
4.2.3 Validación de la interpolación.....	36
4.3 Análisis de conflictos espaciales en el agrosistema azucarero.....	37
4.3.1 Diferencia entre las áreas de las unidades mínimas de manejos. ...	38
4.3.2 Falta de correspondencia entre comportamientos espaciales del fósforo asimilable del suelo y estructuras del agrosistema azucarero. ....	40
4.4 Impacto asociado a la variabilidad espacial del fósforo asimilable del suelo en un campo de caña de azúcar. ....	42
5. Conclusiones.....	47
6. Recomendación .....	48
7. Bibliografía .....	49
8. Anexos .....	67

## **Índice de tablas**

<b>Tabla I.</b> Categorías asociadas a diferentes dosis de fertilizantes para caña de azúcar.....	19
<b>Tabla II.</b> Parámetros estadísticos de los datos.....	20
<b>Tabla III.</b> Peso para cada método de ajuste utilizado. ....	24
<b>Tabla IV.</b> Descripción estadística de los datos. ....	29
<b>Tabla V.</b> Prueba de normalidad de Lilliefors. ....	29
<b>Tabla VI.</b> Modelos probados para el ajuste del semivariograma y parámetros del ajuste. ....	32
<b>Tabla VII.</b> Diferencias entre dosis variables y únicas de SPT en 21,04 ha de caña de azúcar.....	44

## Índice de figuras

<b>Figura 1.</b> Cuantificación biofísica en el enfoque de servicios ecosistémicos. ....	9
<b>Figura 2.</b> Esquema reducido del flujo de servicios ecosistémicos en el agrosistema de la caña de azúcar.....	10
<b>Figura 3.</b> Mapa del área de estudio. ....	16
(Software MapInfo Professional, versión 12.0.2).....	16
<b>Figura 4.</b> Mapa del contenido de fósforo asimilable del suelo en los puntos muestreados a la profundidad de 0 a 20 cm. ....	28
<b>Figura 5.</b> Histogramas de frecuencia (a y b) y gráficos cuartil – cuartil (c y d) de la variable antes y después de la transformación logarítmica. ....	30
<b>Figura 6.</b> Relación entre los valores del fósforo asimilable del suelo y las coordenadas este – oeste (a) y norte – sur (b).....	31
<b>Figura 7.</b> Correlación entre pares de la variable: fósforo asimilable del suelo, a diferentes distancias.....	32
<b>Figura 8.</b> Semivariograma confeccionado a partir de los datos de fósforo asimilable del suelo y el modelo ajustado. ....	33
<b>Figura 9.</b> Predicción espacial del fósforo asimilable del suelo por el método de Kriging Ordinario. ....	35
<b>Figura 10.</b> Desviación estándar .....	37
<b>Figura 11.</b> Validación de residuales.....	37
<b>Figura 12.</b> Dimensiones de las unidades mínimas de manejos.....	39
<b>Figura 13.</b> Intervalos de áreas en que se encuentran las unidades mínimas de manejos en el área evaluada .....	40
<b>Figura 14.</b> Variabilidad del fósforo asimilable dentro de un campo de caña de azúcar. ....	43

## 1. Introducción

Los esfuerzos humanos para producir cantidades cada vez mayores de alimentos dejan su marca en el ambiente (Verhulst *et al.* 2015), muchas de las cuales son indeseables para un planeta superpoblado, cada vez más caliente y con degradación del suelo (Burbano, 2016). Este proceso es causado fundamentalmente por prácticas inadecuadas en la agricultura (FAO, 2016), que ha sido la manera más directa con la que los humanos han alterado la naturaleza (Willemsen *et al.* 2017), con la consecuente disminución a largo plazo de la fertilidad de las tierras (Brussaard, 2012).

De los alimentos que la sociedad consume, un 95% de forma directa o indirecta, se produce en el suelo; sin embargo, esta no es la única utilidad de este valioso recurso, también contribuye al bienestar del planeta y de la sociedad a través de sus funciones y servicios ecosistémicos (Burbano, 2016). Dominati *et al.* (2010) plantea la necesidad real de considerar los procesos de degradación del suelo, causados por prácticas de manejos inapropiadas, en ejercicios de evaluación de servicios ecosistémicos, pues los efectos sólo en algunos casos pueden ser reversibles.

Los servicios ecosistémicos surgen como una nueva conceptualización que relaciona la sociedad y los ecosistemas. Su concepto ha sido desarrollado en la literatura científica por diferentes autores como Daily (1997) y Costanza *et al.* (1997), que impulsaron el desarrollo de esta nueva terminología. En el año 2003 la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio lo definió de una manera simple y concreta, como los beneficios que se obtienen de los ecosistemas (*Millenium Ecosystem Assessment [MEA], 2003*).

En el año 2005, este grupo de investigadores clasificó los servicios ecosistémicos en cuatro categorías según sus funciones; como soporte, regulación, provisión y culturales. Los procesos de soporte sirven de base para la existencia del resto de los servicios ecosistémicos; como formación del suelo, ciclo de nutrientes. Los de regulación influyen en los equilibrios ecosistémicos, como regulación del balance de agua, del clima y control de plagas. Los servicios de provisión constituyen los beneficios que se obtienen de manera directa de los ecosistemas, como fibras, combustibles y alimentos. Los servicios culturales representan los beneficios asociados al disfrute de la

sociedad y goce espiritual, como recreación, esparcimiento y desarrollo de competencias.

En un ecosistema natural existen en mayor proporción soporte, regulación y culturales. Sin embargo, el hombre con el objetivo de obtener una serie de recursos para su crecimiento económico, potencia los servicios de provisión. Estos elementos provocan un cambio de ecosistema a agrosistema, con la transformación de sus estructuras, procesos y funciones con una explotación constante de sus recursos; pues al introducir al hombre y sus mecanismos productivos, los equilibrios naturales se descompensan y dan como resultado severos cambios ambientales (Ramesh y Kaplanay, 2015). Esto modifica el funcionamiento y disminuye la provisión de otros servicios que la sociedad obtiene de los ecosistemas, pero que no son considerados en el costo del producto (Caride *et al.* 2010).

En el agrosistema de la caña de azúcar se producen servicios ecosistémicos en el beneficio de la sociedad, que se originan a partir de los procesos de soporte, determinados por las propiedades del suelo y sus combinaciones de recursos (cita). Este agrosistema, como sistema socio-ecológico, es una de los más importantes en el mundo, de alto impacto social, económico y espacial, por la obtención de un producto básico para la alimentación humana (Aguilar *et al.* 2015).

Para garantizar la seguridad alimentaria, la producción agrícola debe provenir de un suelo sano, sin limitaciones físicas, químicas o biológicas con una productividad agrícola sostenible y con un mínimo deterioro ambiental (Burbano, 2016). En ese contexto, un manejo de mayor precisión debe buscar incrementar el grado de detalle en la información sobre las condiciones del suelo para fomentar decisiones de manejo sostenibles. Según Dominati (2013), se debe minimizar el daño potencial, con base en la ciencia, en lugar de sólo buscar las soluciones para superar las limitaciones.

El fósforo asimilable del suelo constituye uno de los principales indicadores, asociados a procesos de soporte para el desarrollo de la caña de azúcar (cita). En los agrosistemas azucareros, para producir altos niveles de biomasa, el cultivo de la caña de azúcar extrae del suelo cantidades de fósforo para su crecimiento y desarrollo. De esta manera se incurre en la disminución de sus niveles en el suelo y su capacidad para brindar servicios ecosistémicos, si no

se repone en la justa medida y acorde a la variabilidad espacial de este nutriente (cita).

En este sentido, el primer paso es identificar comportamientos espaciales, para actuar con manejos por sitios específicos (Charlotte *et al.* 2014), de manera que se puedan optimizar recursos, potenciar la sostenibilidad y favorecer la economía, con prácticas agrícolas que se adapten a las características variables de los agrosistemas (cita).

Por tanto, es fundamental estudiar el suelo como base de las producciones y el resto de los servicios ecosistémicos, a través del análisis del fósforo asimilable del suelo como propiedad medible, asociada a una o más de sus funciones (Vogel *et al.* 2019), para lo cual se plantea el siguiente **Problema Científico**:

¿En qué medida la variabilidad espacial del fósforo asimilable del suelo influye en la sostenibilidad del agrosistema azucarero?

A lo que se le dará solución con la **Hipótesis**:

Si se realiza una colecta, georreferenciación y análisis químico de muestras de suelo dentro de unidades mínimas de manejos, se podrá ajustar un modelo de predicción espacial e identificar sitios específicos para el manejo de nutriente fosfórico como criterio básico para la sostenibilidad del agrosistema azucarero.

### **Objetivo general**

Analizar la variabilidad espacial del fósforo asimilable del suelo para la sostenibilidad del agrosistema azucarero.

### **Objetivos específicos**

1. Realizar colecta, georreferenciación y análisis químico a las muestras de suelo para determinar el contenido de fósforo asimilable en un agrosistema azucarero.
2. Analizar la estructura espacial del fósforo asimilable del suelo en un agrosistema azucarero.
3. Realizar mediante el modelo de *Kriging* Ordinario, la predicción espacial del fósforo asimilable del suelo en un agrosistema azucarero
4. Analizar la existencia de sitios específicos asociados al fósforo asimilable del suelo, para la sostenibilidad del agrosistema azucarero.

## **2. Revisión bibliográfica.**

### **2.1 Fundamentos teóricos-prácticos de la Investigación.**

Las valoraciones que relacionan sociedad – naturaleza necesitan de enfoques sistémicos para el estudio de los objetos integrados, así como sus dependencias e interacciones (Álvares *et al.* 2006). En los agrosistemas la combinación de elementos bióticos y abióticos determina la provisión de servicios ecosistémicos como, alimento, agua, carbono, madera o forraje (Costanza *et al.* 1997; Daily, 1997; De Groot *et al.* 2002; MEA, 2005), que determinan el bienestar humano. La falta, escasez o distribución desigual de estos servicios pueden ocasionar conflictos sociales o políticos (MEA, 2005).

Según Adhikari y Hartemink (2016), el futuro de las investigaciones sobre esta temática se deberá enfocar en las funciones del suelo y los aspectos espaciales de sus propiedades, de las que depende la provisión de sus servicios. Tomar decisiones de manejo y asignación de tierras para los diferentes usos, requiere de la identificación de riesgos en la salud de los ecosistemas, uso no sustentable de sus propiedades, desigualdades entre demandas y provisión de los servicios. Bruulsema (2018) asegura que la correcta combinación de fuente, lugar, momento y dosis de nutrientes define la sostenibilidad y el mejoramiento de la salud del suelo. Este equilibrio, a través de diferentes enmiendas, es la clave para mantener su fertilidad (Comerford *et al.* 2013), con las entradas en la justa medida (Brussaard, 2012).

### **2.2 Servicios ecosistémicos.**

El ecosistema con su estructura, procesos y funciones (De Groot *et al.* 2002) se define como la entidad formada por componentes interdependientes que funciona como un todo (Álvares *et al.* 2006) e interacciones (procesos ecosistémicos) entre los elementos bióticos (la biodiversidad), abióticos (condiciones climáticas, geomorfológicas, edáficas) que dan lugar a la provisión de servicios ecosistémicos (Costanza *et al.* 1997; Daily, 1997; De Groot *et al.* 2002, MEA, 2005, Riechers *et al.* 2016). Constituyen la base de toda producción que proviene del capital natural y proporcionan múltiples servicios esenciales para la economía y la sociedad (Grunewald *et al.* 2015).

El marco de los servicios ecosistémicos representa una fortaleza para producir cambios ambientales dentro del planeamiento económico y la toma de



decisiones, que promuevan el desarrollo económico-ambiental local y contribuyan a la sostenibilidad (Keith *et al.* 2016).

El estudio de los servicios ecosistémicos, así como sus aplicaciones a la toma de decisiones, es un área creciente con amplias perspectivas y de utilidad para modificar los patrones actuales de uso de los recursos hacia un desarrollo sostenible (Balvanera y Cotler, 2007). Es decir, el interés por este concepto se ha ido incrementado en la ciencia y la política en las últimas décadas (Schröter *et al.* 2019).

El concepto de servicios ecosistémicos surge como una nueva forma de abordar la relación entre sociedad y ecosistema, con la identificación y evaluación de la provisión de servicios en la satisfacción de las necesidades de la humanidad. Ha sido desarrollado en la literatura por diferentes autores (Waweru *et al.* 2016). Daily (1997), lo define como las condiciones y procesos a través de los cuales los ecosistemas naturales y las especies que los componen mantienen la existencia humana. Según Costanza *et al.* (1997) representan los beneficios que la humanidad obtiene, directa o indirectamente, de las funciones ecosistémicas.

Todas estas definiciones, coinciden en que los servicios ecosistémicos son indispensables para la existencia humana. Su análisis permite entender de qué manera los activos naturales afectan la vida en la tierra (Viglizzo *et al.* 2010), marcados por una relación que puede ser directa o indirecta y los seres humanos pueden o no estar conscientes de su existencia (Balvanera y Cotler, 2007).

### **2.2.1 Clasificación de los servicios ecosistémicos.**

Existen acuerdos de cómo estos servicios son agrupados (Adhikari y Hartemink, 2016). En el 2005, la valoración de los ecosistemas del milenio los clasificó en cuatro categorías. Este agrupamiento integró perspectivas ecológicas, económicas e institucionales de los servicios ecosistémicos y generó reflexiones importantes sobre el impacto de los seres humanos en los ecosistemas y viceversa, su efecto en el bienestar de la sociedad (MEA, 2005). Mostró la importancia y el valor de los ecosistemas para la sociedad y las consecuencias de su degradación para la salud y el bienestar humano (Eastwood *et al.* 2016); además estableció las bases científicas para reforzar la

conservación y sostenibilidad del uso de los ecosistemas (MEA, 2005; Eastwood *et al.* 2016).

Esta clasificación establece que los “servicios de soporte”, permiten la existencia de los servicios de provisión, regulación y culturales (MEA, 2003). Sin embargo, se discute si estos deben ser considerados como tales o si realmente constituyen la base para la ocurrencia de los servicios ecosistémicos (Rincón *et al.* 2014).

En una clasificación realizada por la Evaluación de Ecosistemas del Milenio del Reino Unido, se consideran los servicios de soporte como servicios intermedios. Esta decisión se fundamenta en el criterio de diferentes autores, que advierten inconvenientes de doble contabilidad y que cuestionan si los procesos y funciones ecológicas se deben considerar como servicios (*The Economics of Ecosystem and Biodiversity* [TEEB], 2010).

Por otro lado TEEB (2008), defiende que los servicios de soporte, definidos por MEA (2005), no producen beneficios directamente a la sociedad. En este caso se consideran a los servicios de soporte como “estructura biofísica, procesos y funciones”, denominados como servicios de hábitat. Según Ronchi (2018), esta propuesta no logró un acuerdo entre instituciones académicas y científicas, especialmente debido al riesgo de pasar por alto el papel del suelo para los servicios. Dominati *et al.* (2014), plantea que este grupo constituye procesos de soporte y determinan los servicios de provisión, regulación y culturales.

La presencia de diferentes interpretaciones indica la existencia de discrepancias científicas. Sin embargo, todos concuerdan en que los procesos de soporte existen, y son indispensables para el bienestar humano. Su estudio, así como sus aplicaciones a la toma de decisiones, es un área creciente con amplias perspectivas y de utilidad para modificar los patrones actuales de uso de los recursos (Balvanera y Cotler, 2007).

Diversas investigaciones sobre esta temática se han enfocado en la importancia de los suelos para la existencia de los servicios ecosistémicos (Bednářová *et al.* 2016; Keith *et al.* 2016; Bogunovic *et al.* 2017; Drobnik *et al.* 2018). Según Adhikari y Hartemink (2016) los servicios ecosistémicos del suelo dependen de sus propiedades, así como de la interacción de las mismas, y principalmente son influenciados por su uso y manejo.

### **2.3 Servicios ecosistémicos del suelo.**

La humanidad a través de la historia ha asumido que la provisión y accesibilidad de recursos aportados por los ecosistemas es libre e inagotable, por lo que su contribución queda fuera de las programaciones de manejo y de la mayoría de las evaluaciones económicas usuales. Sin embargo, modificaciones en las propiedades de los ecosistemas agrícolas afectan su funcionalidad (Erhard *et al.* 2017), lo que disminuye la provisión de servicios que no son considerados en el costo del producto (Caride *et al.* 2010). La fuente impulsora de estos cambios ha sido un deseo creciente de aumentar el flujo de servicios de aprovisionamiento, a partir de actividades socio-económicas (Gaba *et al.* 2015).

El monitoreo de estos servicios, es fundamental para el manejo sostenible de las áreas agrícolas (Willemen *et al.* 2017), donde las propiedades químicas del suelo constituyen elementos críticos para el desarrollo de los cultivos (Ronchi, 2018). Según Moebius *et al.* (2016) a través de la identificación de cuáles nutrientes deben restituirse por recomendación, se mitigará el efecto de elementos limitantes sobre el rendimiento agrícola.

Diversas son las investigaciones que asocian el suelo con la provisión de servicios ecosistémicos, a partir de análisis de su estructura, procesos y funciones (anexo 1). Este recurso es considerado como el mayor proveedor de servicios ecosistémicos, pues contiene de 1/4 a 1/3 de los organismos vivos del planeta (Burbano, 2016).

El suelo es no renovable en la escala de tiempo de vida humana, debido a la proporción extremadamente lenta de los procesos de regeneración (Ronchi, 2018). Entonces, para tomar medidas eficaces y mejorar los servicios ecosistémicos del suelo, sus propiedades y procesos que sostienen cada servicio, necesitan ser investigadas en detalle (Su *et al.* 2018). Evaluar niveles de fertilidad de este recurso, determinados por sus propiedades, es la base para el manejo sostenible del agrosistema de la caña de azúcar (García y Orozco, 2021).

#### **2.3.1 Aspectos espacio – temporales de los servicios ecosistémicos.**

El flujo de servicios ecosistémicos resulta de una multitud de factores biofísicos, sociales e institucionales, que influyen en la modificación de

capacidades de los ecosistemas para proveer servicios, como los manejos del suelo (Schröter *et al.* 2019).

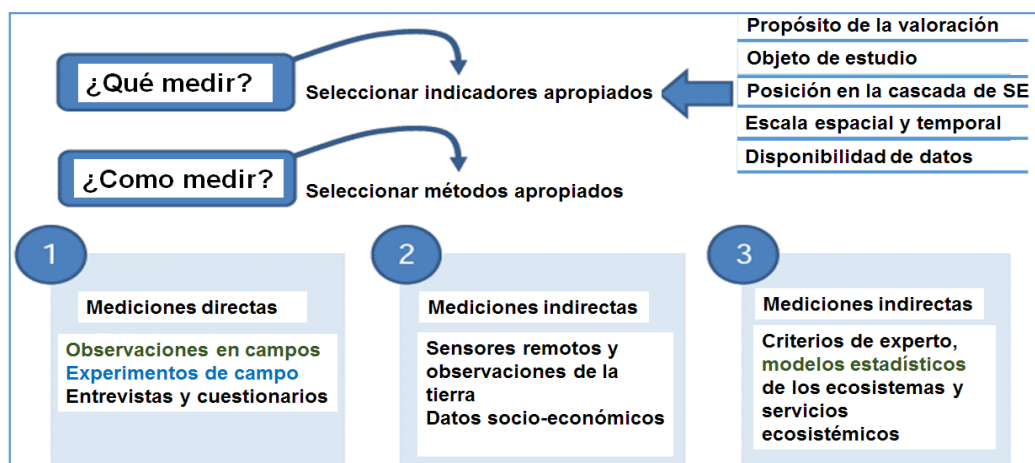
Cambios individuales de estos servicios en el tiempo son relevantes para determinar el efecto de las intervenciones, evaluar políticas y estimar escenarios futuros (Grunewald *et al.* 2015). Por otro lado, el funcionamiento de los ecosistemas depende de los procesos que ocurren en el suelo y se delimita por las condiciones biofísicas (Ronchi, 2018). Estas dinámicas pueden ser evaluadas a través del análisis de las propiedades medibles del suelo, que contienen información substancial respecto a una o más de sus funciones (Vogel *et al.* 2019).

La caracterización espacial requiere de numerosos datos de campos que pueden ser colectados por métodos directos o indirectos (Bogunovic *et al.* 2017). El análisis espacial permite la elaboración de mapas de variabilidad para un periodo de tiempo. Los mapas resultantes proveen sugerencias para las prácticas de recuperación que deben ser acogidas para alcanzar sostenibilidad en los agrosistemas (Bogunovic *et al.* 2018).

La habilidad para entender el suelo depende de la escala en que se observen y modelen sus características y procesos (Paterson *et al.* 2018). Cambios en su composición y estructura modifican la magnitud y distribución espacio-temporal de los reservorios y flujos de elementos del suelo (Latterra *et al.* 2010).

Según Grunewald *et al.* (2015) las áreas de provisión de servicios ecosistémicos están sujetos a fluctuaciones naturales y tendencias que pueden afectar su funcionalidad ocasional o permanentemente. Por lo tanto, aumentar los conocimientos sobre las distribuciones espaciales de sus propiedades químicas es vital para los manejos de tierras y potenciar los niveles de producción, así como para proveer aspectos importantes en la restauración ecológica y la reconstrucción de zonas degradadas (Sankar *et al.* 2018).

Para cuantificar diferentes componentes de servicios ecosistémicos, es necesario definir dos preguntas (figura 1): ¿Qué se debe medir? y ¿Cómo se debe medir? (Vihervaara *et al.* 2017). Pueden usarse diferentes indicadores para medir un solo servicio ecosistémico o procesos relacionados. La elección de indicadores depende de varios factores como el propósito, la hipótesis específica, la escala espacial y temporal que se considere y la disponibilidad de datos (Vihervaara *et al.* 2017; Cord *et al.* 2019).



**Figura 1.** Cuantificación biofísica en el enfoque de servicios ecosistémicos.

**Fuente:** Vihervaara *et al.* (2017)

Entonces para valorar eficazmente los servicios ecosistémicos en un agrosistema, es necesario considerar indicadores del suelo, así como su distribución espacial. Pues Laterra *et al.* (2010), plantea que la provisión de estos servicios es muy dinámica y heterogénea en el espacio.

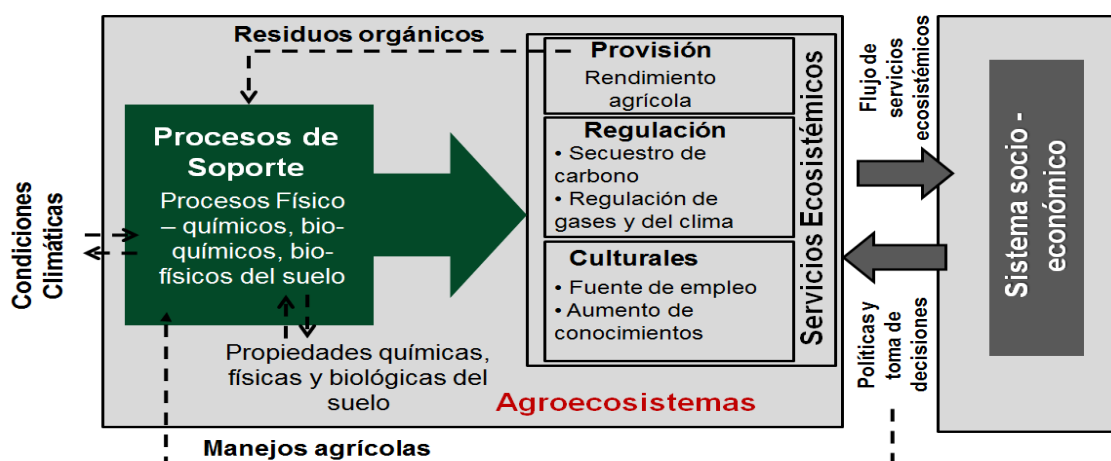
#### **2.4 Procesos de soporte y servicios ecosistémicos en el agrosistema de la caña de azúcar.**

Los servicios ecosistémicos son resultado de las interacciones entre estructuras y procesos ecosistémicos, sin embargo en los agrosistemas, a estas interacciones se les adicionan los manejos, como acciones encaminadas a potenciar un beneficio específico de una región en concordancia con objetivos económicos. El cultivo de la caña de azúcar (*Saccharum Officinarum*), como sistema socio-ecológico, tiene un alto impacto en el mundo social, económico y espacial, por la obtención de un producto básico para la alimentación humana (Aguilar *et al.* 2015).

En Cuba, este cultivo ocupa un área aproximada de 750 mil hectáreas, orientado hacia la búsqueda y adquisición de tecnologías para mejorar su eficiencia y los rendimientos agrícolas por hectárea (González, 2015). Sin embargo, para producir altos niveles de biomasa, este cultivo extrae del suelo elementos que son básicos para su crecimiento y desarrollo (Pérez *et al.* 2015). De esta manera, cosecha tras cosecha, se incurre en el agotamiento de este recurso, que, con el tiempo, se degrada y disminuye su fertilidad. Por tal motivo, se vuelve imprescindible el estudio y valoración del flujo de servicios

ecosistémicos en este agrosistema y su relación con el sistema socio-económico. Fallos en el reconocimiento del potencial de servicios ecosistémicos pueden tener consecuencias importantes para el manejo de los recursos (Vang *et al.* 2016). Valoraciones locales permiten un entendimiento multifuncional y pueden indicar pérdidas potenciales en los mismos (Soy Massoni *et al.* 2016)

El entendimiento de los servicios ecosistémicos dentro del agrosistema de la caña de azúcar es la búsqueda del aprovechamiento en su totalidad de sus funciones. Pues, la sociedad se sustenta de los ecosistemas para satisfacer sus necesidades, pero sus acciones modifican los ecosistemas y producen dinámicas de cambio continuo (Rincón *et al.* 2014), de manera que interaccionan los servicios ecosistémicos con el sistema socio – económico (figura 2).



**Figura 2.** Esquema reducido del flujo de servicios ecosistémicos en el agrosistema de la caña de azúcar (Elaboración propia)

El aumento de la producción en el agrosistema azucarero depende de factores naturales y antrópicos para satisfacer una demanda de productos (servicios de provisión). Sin embargo, la sociedad sólo percibe los beneficios que se comercializan en el mercado (azúcar en este caso), y no se percatan de que la base de los servicios ecosistémicos son los procesos de soporte (Khan, 2021). El suelo y los nutrientes que el cultivo necesita en el agrosistema azucarero constituyen recursos finitos, pues se requiere de la reposición de los mismos acorde a las necesidades específicas de cada sitio. Al respecto Cuéllar *et al.* (2003), plantean que en las prácticas agrícolas, el manejo eficiente de

fertilizantes evita que el déficit de nutrientes constituya un factor limitativo del rendimiento agrícola, y que su empleo irracional contribuya a la contaminación del medio ambiente.

Para el manejo de la fertilidad del suelo en este agrosistema se han definido categorías respecto a su contenido de fósforo asimilable según el Manual de Servicio de Fertilización de la Caña de Azúcar [SERFE] (2014), que diferencian la respuesta del cultivo a la fertilización fosfórica de una categoría a otra. Esta relación constituye la base para la recomendación de fertilizante en el agrosistema de la caña de azúcar.

Mantener la infraestructura ecológica del suelo; reforzar sus propiedades en general es un requisito para una intensificación sostenible (Kibet *et al.* 2016; Jónsson *et al.* 2019). Desde esta perspectiva, el agrosistema de la caña de azúcar no se compone de procesos aislados; tampoco es una unidad íntegra homogénea. Es la interrelación de estructuras, procesos y funciones que comienza con la identificación de propiedades, el manejo correspondiente, para obtener altos rendimientos agrícolas. Estas interrelaciones del sistema ecológico con el económico-social y la dependencia que presentan las sociedades del flujo de servicios ecosistémicos, muestran la necesidad urgente del uso eficiente de los recursos, así como de manejos sostenibles para una producción y consumo sustentable (Perlatti *et al.* 2014).

#### **2.4.1 Fósforo asimilable del suelo como indicador biofísico de procesos de soporte y servicios ecosistémicos.**

En la práctica, la mineralización de la materia orgánica, los ciclos de nutrientes, el secuestro de carbono, o el control de la erosión, son procesos claves que se proveen en los ecosistemas (De Groot *et al.* 2002) y se encuentran estrechamente vinculados a la provisión de servicios ecosistémicos (Ferraro *et al.* 2010). Las rendimientos, las determinaciones de pH, los nutrientes asimilables del suelo, son indicadores para las evaluaciones en el enfoque de servicios ecosistémicos (González *et al.* 2015).

El fósforo constituye uno de los macro-elementos que necesitan las plantas para su desarrollo. Khan *et al.* (2018), resalta la importancia de este elemento y señala que sus niveles en el suelo deben mantenerse o incrementarse. Según Cuéllar *et al.* (2003), en el agrosistema azucarero, el fósforo ejerce un efecto decisivo en la brotación, desarrollo radical, elongación de los tallos y

ahijamiento; se encuentra donde la actividad fisiológica es mayor y aunque no es consumido en grandes cantidades como el nitrógeno y el potasio, su abastecimiento adecuado es esencial para obtener óptimas cosechas Pérez *et al.* 2015).

El fósforo actúa en los procesos de fotosíntesis, respiración, división celular, almacenamiento y transferencia de energía y forma parte de los ácidos nucleicos, los fosfolípidos y coenzimas respiratorias (Cuéllar *et al.* 2003; Kingston, 2014). Este último autor, afirma que la cantidad de dióxido de carbono capturado durante el proceso fotosintético de la caña de azúcar, depende de la asimilación de fósforo. Este cultivo extrae del suelo entre 0,4 y 0,5 kg de  $P_2O_5/t \cdot \text{año}$  y su efecto depende, en primera instancia, del contenido de las formas asimilables en el suelo (Cuéllar *et al.* 2003). Por ello aumentar los conocimientos sobre sus distribuciones espaciales, es vital lograr rendimientos óptimos en este agrosistema, a partir del manejo sostenible del suelo (García y Orozco, 2021).

## **2.5 Metodologías para evaluar servicios ecosistémicos en agrosistemas.**

Para un manejo por ecosistema se requiere que diferentes servicios proporcionados por un recurso sean considerados en la toma de decisiones y contar además, con cuantificaciones y valoraciones sistémicas que integren el medio natural con el económico-social (Rótolo y Francis, 2008; Fulford *et al.* 2016).

Para la evaluación de los servicios ecosistémicos son necesarios métodos que revelen dinámicas naturales o cambios en los ecosistemas y lograr así, una mejor adaptación a los impactos causado por la utilización antrópica (Grunewald *et al.* 2015).

Las prácticas utilizadas en la agricultura, casi siempre motivadas por un deseo de aumentar el flujo de servicios de aprovisionamiento (Gaba *et al.* 2015), impactan los agrosistemas y afectan los rendimientos de los cultivos. Se debe potenciar un equilibrio entre los servicios ecosistémicos, fundamental para garantizar sostenibilidad, donde la valoración biofísica de los agrosistemas es una estratagema hábil (Viglizzo *et al.* 2010).

Este proceso consiste en mediciones o estimación de aspectos relacionados al funcionamiento y la estructura de los ecosistemas (Ferraro *et al.* 2010). Se necesitan métodos que revelen dinámicas naturales o cambios en sus



propiedades y lograr así, una mejor adaptación a los impactos causado por acciones antrópicas (Grunewald *et al.* 2015).

Estos métodos constituyen un paso concreto que permite entender mejor de qué manera los activos naturales afectan la calidad de la vida en la Tierra (Daily, 1997). Junto a datos de valores integrados en la investigación y las políticas, es una fortaleza para construir cambios ambientales, promover el desarrollo y contribuir a la sostenibilidad (Keith *et al.* 2016).

Un uso sostenible de los servicios ecosistémicos necesitan que los flujos actuales sean igual o menor a las capacidades del ecosistema de proveerlos (La Nottea *et al.* 2016). Los avances científicos en el entendimiento de los servicios ecosistémicos son indispensables para poder transferirlos hacia la sociedad de tal forma que se incluyan en la toma de decisiones y en la generación de políticas que aseguren su mantenimiento (Balvanera y Cotler, 2007).

Este proceso requiere de metodologías que permitan inferir, de manera directa o indirecta y con diferente nivel de sensibilidad, la provisión de los servicios como resultado de cambios espaciales y temporales en los ecosistemas (Ferraro *et al.* 2010).

Las maneras para valorar los servicios ecosistémicos se pueden agrupar en valoraciones económicas, sociales y biofísicas (Gaba *et al.* 2015). Las valoraciones económicas, son el tránsito de aspectos cualitativos y cuantitativos, en dinero (Ronchi, 2018). Sin embargo, la valoración económica incluye sólo una parte del verdadero valor. También se debe incluir el valor ecológico y socio-cultural de un ecosistema o servicio; referidos al estado de la salud del ecosistema y a la importancia que las personas otorgan a los servicios ecosistémicos, respectivamente (De Groot *et al.* 2010).

El valor ecológico se refiere al estado de la salud del ecosistema, mientras que el socio – cultural a la importancia que las personas otorgan a los servicios ecosistémicos (De Groot *et al.* 2010). Los procesos biofísicos y sociales median entre la provisión de los servicios y la apropiación o captura de los mismos por la sociedad, y entre éstos y la vulnerabilidad ambiental (Ferraro *et al.* 2010).

Las valoraciones biofísicas procuran obtener estimaciones confiables y creíbles que reflejen el valor funcional de los ecosistemas, más allá de una percepción ocasional u oportunista de utilidad económica (Latterra *et al.* 2010). Estas

metodologías se basan en el entendimiento de la interdependencia entre los sistemas naturales y sociales, con el fin de lograr metas y políticas específicas que garanticen la sostenibilidad (Andrade *et al.* 2011).

Las mediciones directas son la medida real de un estado, a partir del monitoreo de indicadores, que representan el área de estudio y por otro lado, las mediciones indirectas necesitan del procesamiento de datos o su combinación con modelos previo a su utilización para la medición de un servicio ecosistémico (Vihervaara *et al.* 2017).

El reconocimiento de componentes físicos y biológicos de los ecosistemas es el aspecto principal al momento de inferir su funcionamiento actual y de hacer inferencias sobre su estado futuro (De Groot *et al.* 2002). La base común de esta aproximación es identificar elementos estructurales y asociarlos con la posibilidad de brindar un servicio (Ferraro *et al.* 2010). Si se identifican y miden los servicios ecosistémicos de alguna manera, se contribuiría a la disminución de la degradación de los recursos naturales y se proporcionaría una mejor planeación ambiental, lo que alienta a la sustentabilidad y el bienestar humano. Pues el reconocimiento de componentes de los ecosistemas es el aspecto principal al momento de inferir su funcionamiento actual y de hacer inferencias sobre su estado futuro (de Groot *et al.* 2002).

Según Ronchi (2018), la selección del método depende de la disponibilidad de datos, representatividad de los datos para el servicio ecosistémico considerado y el mapeo de servicios ecosistémicos, como herramienta guía en la toma de decisiones.

En la práctica, la mineralización de la materia orgánica, los ciclos de nutrientes, el secuestro de carbono o el control de la erosión, son funciones claves que se proveen en los ecosistemas agrícolas y naturales (De Groot *et al.* 2002); estrechamente vinculados a la provisión de servicios ecosistémicos (Ferraro *et al.* 2010). Por ello las salidas agrícolas como rendimientos a diferentes escalas, las determinaciones de pH, elementos asimilables y materia orgánica son indicadores para evaluar los servicios ecosistémicos (González *et al.* 2015).

En el caso de las mediciones biofísicas para el análisis de distribuciones espaciales de diferentes propiedades químicas del suelo, es necesario establecer diseños eficientes y robustos para la colecta de muestras de suelo

(Hou *et al.* 2017); requisito previo a los análisis químicos e interpretaciones estadísticas y geo-estadísticas (García y Orozco, 2021).

### **2.5.1 Geoestadística como herramienta para evaluar procesos de soporte y servicios ecosistémicos.**

Las investigaciones en los servicios ecosistémicos se esfuerzan por entender los procesos biofísicos, así como las aplicaciones complejas e implicaciones de esos procesos (LaDeau *et al.* 2017). Para tomar medidas eficaces y mejorar los servicios ecosistémicos, las propiedades y procesos que sostienen cada uno necesitan ser investigado en detalle (Su *et al.* 2018).

El análisis geoestadístico permite conocer la variabilidad espacial de propiedades del suelo, como indicadores de procesos de soporte, establecer manejos diferentes entre zonas, optimizar el uso de los insumos de acuerdo a las necesidades del cultivo y así, disminuir el impacto ambiental (Melchiori *et al.* 2014).

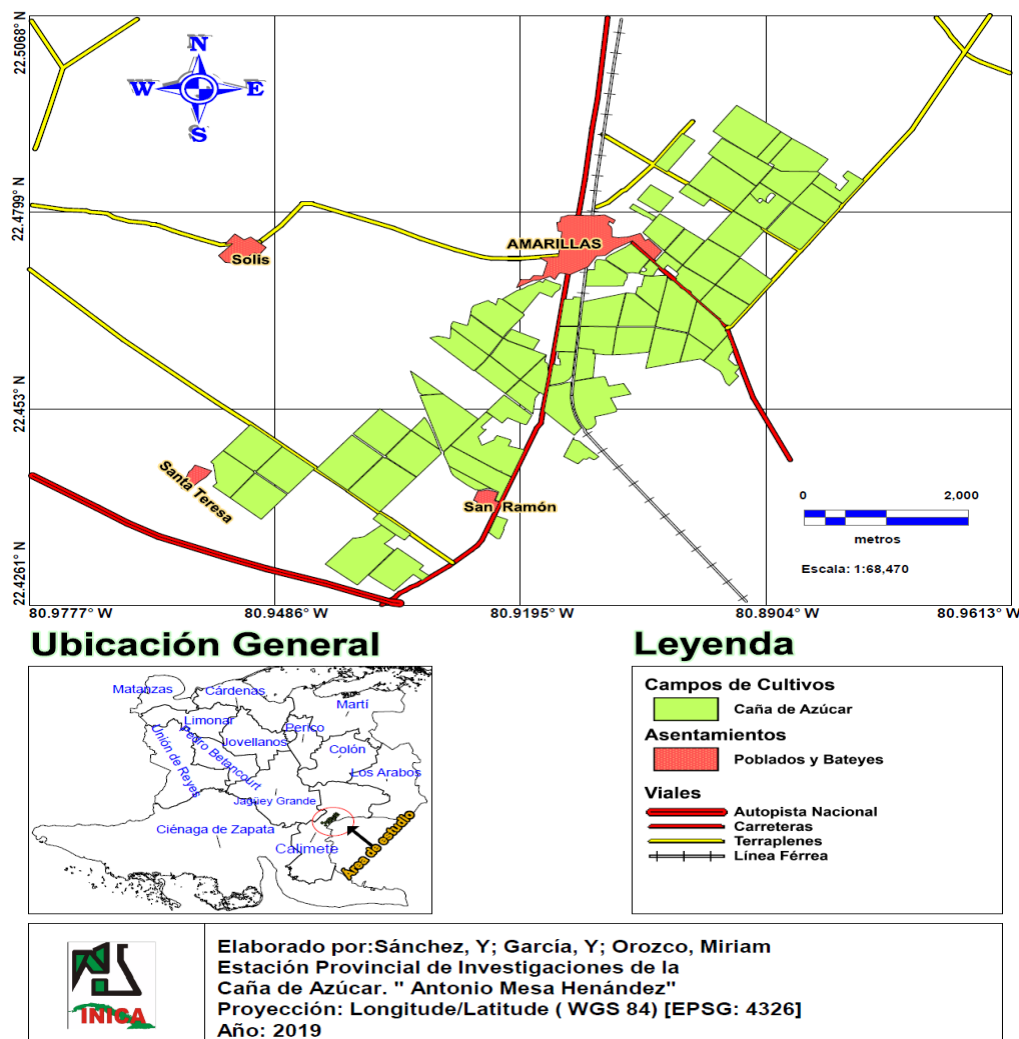
La caracterización espacial es muy útil para mostrar desigualdades entre provisión, flujos y demandas de diferentes servicios ecosistémicos y constituyen un instrumento obligatorio para la optimización del uso del suelo (Burkhard y Maes, 2017).

Diversas investigaciones han realizado cuantificaciones de servicios ecosistémicos, análisis de conflictos (Mokondoko *et al.* 2018) y entendimiento de distribuciones espaciales de diferentes indicadores, con el uso combinado de sistemas de información geográficas, geoestadística y estadística multivariada (Cai *et al.* 2019).

### 3. Materiales y Métodos.

#### 3.1 Descripción del área de estudio.

El agrosistema del cultivo de la caña de azúcar evaluado en este estudio se localiza entre las coordenadas 22° 25' 42" N a 22° 29' 39" N y 80° 57' 22" O a 80° 52' 43" O, sobre un suelo *Ferralsol*, que pertenece al municipio de Calimete, provincia Matanzas, Cuba (figura 3).



**Figura 3.** Mapa del área de estudio.

(Software MapInfo Professional, versión 12.0.2)

El área se compone de dos unidades de producción de caña (UPC) "28 de enero" y "Dagoberto Rojas", las cuales se subdividen en bloques y estos a su vez en unidades mínimas de manejo (campos de caña de azúcar). Esta concepción es una estructura creada por el hombre, que establece límites para el manejo de los recursos y la gestión agrícola en caña de azúcar.

El agrosistema azucarero se compone de 74 unidades mínimas de manejos, que ocupan una superficie total de 1 261,41 ha. El 38% del área evaluada se encuentra bajo un sistema de riego, que permite alcanzar mayores rendimientos del cultivo.

El análisis de los servicios ecosistémicos en el agrosistema azucarero es un enfoque hacia los beneficios producidos por el capital natural y su relación con las acciones antrópicas; con una visión holística para potenciar el manejo sostenible.

### **3.1.1 Comportamiento de variables climáticas.**

Los datos de las variables climáticas referidos provienen de la Estación Meteorológica de Colón, ubicada a 22° 41' 04" N y 80° 55' 30" O. Los valores más altos de temperatura media se registran en la temporada lluviosa y época de verano, con cifras que oscilan entre 25 °C y 27 °C, en los meses de julio y agosto, respectivamente.

Las precipitaciones anuales en el período de 2008 a 2017 promedian 1539 mm, donde la etapa lluviosa es de mayo a octubre, en la cual cae 85% de las precipitaciones totales anuales. Un período de pocas precipitaciones se establece en los meses de noviembre a abril, donde se registra 15% de las lluvias anuales.

## **3.2 Recopilación de los datos.**

### **3.2.1 Georreferenciación**

Las determinaciones para escalas espaciales necesitan de la combinación con el mapeo de las áreas en explotación para la realización de mapas temáticos, que recogen comportamientos, manejos o beneficios. Los comportamientos se refieren a la identificación de sitios específicos para las propiedades del agrosistema, tomadas como indicadores de calidad del suelo.

Para la georreferenciación de las muestras de suelo se verificaron las configuraciones del Servicio de Posicionamiento Global [GPS], relacionadas con la posición geográfica de Cuba, así como del sistema de unidades internacionales de medición adoptado. Una vez configurado el equipo, se esperó que el GPS adquiriera la señal de los satélites, con una precisión de 5 metros. Posteriormente, se georreferenció el centro de cada unidad mínima de manejo. En el caso en que las dimensiones de los campos sobrepasaban las 5

ha, se realizaron divisiones virtuales hasta obtener las extensiones especificadas y se georreferenció el centro de cada sub-área (anexo 2).

### **3.2.2 Muestreo de suelo e identificación de muestras.**

El muestreo de suelo es la base fundamental para las evaluaciones ambientales en los agrosistemas. Del rigor con que se realice esta actividad dependerá en gran medida la calidad de las recomendaciones agroquímicas para determinar el uso racional de los fertilizantes.

El estudio se realizó en el año 2015. El muestreo se ajustó para áreas menores o iguales a 5 ha. En el caso en que las dimensiones de las unidades mínimas de manejo sobrepasaban las 5 ha, se incrementó el número de muestras tomadas, se dividió el área hasta obtener las extensiones especificadas y aplicar el muestreo de suelo.

Cada muestra se formó a partir de 30 sub-muestras tomadas a la profundidad de 0 a 20 cm, con el uso de barrena agroquímica y en forma diagonal para cada unidad mínima de manejo. Para la conformación de la muestra compuesta se aplicó el método del cuarteo (anexo 3).

El muestreo se realizó posterior a la cosecha en el año 2015, con un total de 241 muestras. En las áreas establecidas de una o más cosechas (93.3 % del área), las 30 sub-muestras se tomaron de forma alterna en el surco y entre surco.

Todas las muestras de suelo fueron debidamente identificadas a través de tarjetas de muestreo, colocadas por duplicado (interior y exterior de la bolsa). Las muestras fueron conservadas en un local previamente habilitado, junto a dos documentos oficiales: el acta de entrega y la relación de muestras. Posteriormente fueron trasladadas a la Estación Provincial de Investigaciones de la Caña de Azúcar (EPICA) "Antonio Mesa Hernández", donde pasaron por los procesos de secado, molienda, tamizado y homogenización, para su posterior análisis en el laboratorio.

El proceso de secado se realiza de manera natural, donde se colocan las muestras en una bandeja plástica y se exponen al sol. La molienda se efectúa en un motor que se encuentra en la parte trasera del laboratorio de suelo, de donde las muestras son trasladadas hacia el tamiz, donde se toman para los análisis las muestras con 2 mm de diámetro.

### 3.2.3 Determinaciones analíticas.

Los análisis químicos de las muestras colectadas se realizaron en el laboratorio de suelo, agua y tejido vegetal de la Estación Provincial de Investigaciones de la Caña de Azúcar “Antonio Mesa Hernández” de Jovellanos, Matanzas; entidad correspondiente al Instituto de Investigaciones de la Caña de Azúcar (INICA). A cada muestra de suelo se le determinó el contenido de fósforo asimilable (mg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/100 g), extraído con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0.1 N (Oniani), utilizado en los agrosistemas con caña de azúcar (Pérez *et al.*, 2015). La determinación se realizó por Colorimetría, medido en un *Spectrophotometer* de acuerdo con las Normas Metodológicas del Departamento de Suelos y Agroquímica (1980).

Según Cottenie (1984), la utilidad de los resultados numéricos de los análisis de suelo dependen de tenerlos relacionados con la cantidad de nutrientes que se necesita aplicar para obtener rendimientos óptimos. El establecimiento de categorías de fósforo asimilable permite diferenciar los suelos en función de la probabilidad de respuesta a la fertilización (Sánchez, 1981).

Para el manejo de la fertilidad en los agrosistemas azucareros se han definido dosis específicas del nutriente evaluado, asociadas a las categorías presentes en el suelo (tabla I). Estas categorías fueron obtenidas por el grupo de Suelos y Agroquímica, a partir de investigaciones desarrolladas por más de 40 años en el Instituto de Investigaciones de la Caña de Azúcar (INICA).

**Tabla I.** Categorías asociadas a diferentes dosis de fertilizantes para caña de azúcar.

Categorías*	Fósforo asimilable (mg p <sub>2</sub> o <sub>5</sub> *100g <sup>-1</sup> )
Muy alto	≥ 13,0
Alto	≥ 8,3-< 13,0
	≥ 3,6-< 8,3
	≥ 3,0-< 3,6
	≥ 2,4-< 3,0
Medio	≥ 1,8-< 2,4
	≥ 1,2-< 1,8
Bajo	< 1,2

\* Tomado de Pérez *et al.* (2015).

La relación del contenido del fósforo asimilable del suelo con las categorías en este agrosistema, constituye la base para el manejo de recursos y permite potenciar servicios de provisión (rendimiento del cultivo) y mantener los niveles de nutrientes del suelo (procesos de soporte). También son una medida del riesgo asociado, pues el desconocimiento y carencia de restitución de nutrientes acorde a las necesidades de cada categoría reducen la capacidad productiva del agrosistema, al convertirse el elemento en cuestión en un factor limitante.

### 3.3 Análisis exploratorio de los datos.

El análisis exploratorio permite descubrir regularidades y singularidades de los datos, a partir de un entendimiento básico de los mismos. Tiene tres objetivos: analizar la cantidad, calidad y ubicación de los datos disponibles; definir la zona de estudio y anticipar dificultades o problemas que puedan surgir en la fase de estimación local (Emery, 2013).

Los parámetros estadísticos correspondientes a distribuciones con una variable se pueden clasificar en: medidas de centralización, dispersión y forma (Febrero *et al.* 2008). Las medidas de centralización son parámetros estadísticos alrededor de los cuales se distribuyen los datos de la distribución y se toman como el centro de la misma. Las de dispersión indican cuánto se alejan del centro los valores de la distribución. Por último, las medidas de forma indican la proporción de individuos de la distribución que hay antes y después de un determinado valor.

Los parámetros estadísticos para el análisis exploratorio de los datos de fósforo asimilable del suelo, se describen en la tabla II.

**Tabla II.** Parámetros estadísticos de los datos.

<b>Ecuación</b>	<b>No. De ecuación</b>	<b>Descripción</b>
$\bar{X} = \frac{\sum X_i}{N}$	Ec. 1	$\bar{X}$ : Media, xi: Valor de cada medición n: cantidad de muestra
$S = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{N - 1}}$	Ec. 2	S: Desviación estándar $\bar{X}$ , xi y n: Idem. Ec.1
$CV = \frac{S}{\bar{X}} * 100$	Ec. 3	CV: coeficiente de variación



Ecuación	No. De ecuación	Descripción
		$\bar{X}$ yS: iden. Ec. 1 y 2

### 3.3.1 Normalidad de los datos.

La distribución de respuesta *gaussian* (normal), es la más usada de todas las distribuciones de probabilidad (Febrero *et al.* 2008). Este criterio es de suma importancia ya que para la mayoría de los procedimientos de la estadística de inferencia se requiere que los datos sigan este comportamiento. Su principal ventaja radica en el supuesto 95% de los valores, que se encuentra dentro de una distancia de dos desviaciones estándar de la media aritmética. Según Bogunovic *et al.* (2014), el análisis de normalidad de la variable tiene importantes implicaciones en el desarrollo de los métodos de interpolación.

Para el análisis de la distribución normal del fósforo asimilable del suelo en el agrosistema de caña de azúcar evaluado en este trabajo, se utilizaron varios métodos, que incluyen métodos numéricos (prueba de *Lilliefors*) y métodos gráficos (gráfico Q-Q, histograma de frecuencias). Además, se analizaron los coeficientes de asimetría y *kurtosis*, que indican si los datos presentan una distribución normal o no.

#### Gráfico cuartil – cuartil.

El gráfico Q-Q consiste en comparar los cuantiles de la distribución observada con los cuantiles teóricos de una distribución normal, con igual media y desviación estándar que los datos de la muestra.

#### Histograma de frecuencias.

El histograma de frecuencias consiste en dividir el rango de los valores en intervalos (generalmente, con el mismo ancho) y mostrar la proporción de datos incluidos en cada intervalo. Su visualización es un primer medio para verificar la homogeneidad (Emery, 2013), percibir la distribución de probabilidad, existencia de normalidad y simetría de los datos.

#### Coefficientes de asimetría y *kurtosis*.

Los coeficientes de asimetría y *kurtosis* constituyen medidas de forma y describen la manera como los datos tienden a reunirse de acuerdo con la frecuencia con que se hallen dentro de la información. La asimetría nos permite

identificar si los datos se distribuyen de forma uniforme alrededor del punto central o media aritmética. Mientras que el coeficiente de *kurtosis* determina el grado de concentración que presentan los valores en la región central de la distribución.

### **Transformación de los datos.**

Por lo general, la teoría estadística va a ser más sencilla cuanto mayor sea la simetría de la variable estudiada y para ello, se dispone de transformaciones (Febrero *et al.* 2008). En este estudio, se ajustaron los datos del fósforo asimilable a una distribución normal a través de una transformación logarítmica de los datos (ecuación 4).

$$\text{Variable transformada} = \log_{10}(P_2O_5 + X) \quad (\text{Ec.4})$$

Donde:

$P_2O_5$ : valores de fósforo asimilable de cada muestra de suelo

X: escalar que se añade a cada valor, para este caso fue de 0.5

### **3.3.2 Análisis de tendencias y mapa de distribución por categorías de fósforo asimilable del suelo.**

Como parte del análisis exploratorio de los datos de fósforo asimilable del suelo en el agrosistema azucarero se realizó un análisis de tendencias, se construyó el gráfico de dispersión de la variable con respecto a las coordenadas de ubicación geográfica (latitud y longitud).

Se construyó un mapa de distribución de los datos de fósforo asimilable del suelo por categoría, diferenciadas por colores. Según Emery (2013), los mapas de datos pueden incluir información sobre los valores medidos y brindar una idea preliminar de la distribución y continuidad espacial de la variable estudiada.

Todos los análisis estadísticos fueron realizados con el lenguaje de programación R (*software* libre), versión 3.6.1 (R Core Team, 2019).

### **3.4 Análisis estructural de los datos.**

El análisis estructural de los datos es una de las etapas fundamentales del estudio geoestadístico, tiene como objetivo la caracterización de la estructura espacial del fenómeno estudiado según el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología de Perú [Senamhi] (2014). Permite conocer la forma en que varía cualquier variable continua en el espacio (patrón espacial). Considera cada valor muestral (variable aleatoria  $z$ ) asociado a una posición (coordenadas  $x$ ,  $y$ )

y utiliza esta dependencia para hacer inferencias sobre la distribución de los datos (Fernández y Ribes, 2014).

Según Gallardo (2006), esta variación es clave para explicar procesos ecológicos a diferentes escalas espacio-temporales. Permite la elaboración de mapas de variabilidad del suelo, que proveen sugerencias para las prácticas de recuperación de calidad de este recurso y alcanzar sostenibilidad en la agricultura (Bogunovic *et al.* 2018).

El análisis estructural realizado en este trabajo, se utilizó para describir la distribución del fósforo asimilable del suelo en el agrosistema de la caña de azúcar. El procedimiento seguido se basó en el análisis de la correlación espacial entre las muestras (Piotrowska *et al.* 2019); expresada en términos de semivarianza (Kumar y Sinha, 2018). A través de la construcción del semivariograma experimental se ajusta un modelo teórico, que fue utilizado en la interpolación de la variable. Además, se evaluó la predicción obtenida mediante la validación cruzada.

#### **3.4.1 Estimación del semivariograma experimental.**

El semivariograma es la herramienta principal de la geoestadística (Oliver y Webster, 2015) para la descripción de la variación espacial de un fenómeno. Consiste en una función matemática que permite estudiar las diferencias entre muestras y la direccionalidad de los valores, refleja cómo la variable cambia de una localización a otra. Como regla general el número mínimo de pares para representar un punto en el semivariograma debe ser superior a 30 y el número de puntos en el área evaluada, no debe ser inferior a 50 (Gallardo, 2006).

La modelación del semivariograma experimental para los valores del fósforo asimilable del suelo en el agrosistema azucarero está representada por la ecuación 5.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (\text{Ec 5})$$

Dónde:

$\gamma(h)$  es la semivarianza para todas las muestras localizadas en el intervalo de distancia  $h$ .

$N(h)$ , es el número total de pares de muestras separados el intervalo de distancia  $h$ .

$Z(x_i)$  es el valor de la muestra en una localización  $x_i$ .

$Z(x_i+h)$  es el valor de la muestra a la distancia de intervalo  $h$  desde  $x_i$ . La distancia a la cual el semivariograma alcanza su meseta se denomina alcance y marca la zona de influencia en torno a un punto más allá de la cual la autocorrelación es nula. Con frecuencia el semivariograma es discontinuo en el origen, con un salto finito que se nombra pepita o efecto pepita (efecto *nugget*). El alcance, la meseta y el efecto pepita definen las características del semivariograma (anexo 4). La razón del efecto pepita a la meseta es a menudo llamada como el efecto pepita relativo y se expresa usualmente en porcentaje (Nicolas, 2004).

### 3.4.2 Ajuste de los datos.

El semivariograma experimental se ajusta a un modelo teórico y se analiza e interpreta dicho ajuste, lo que permite extraer una serie de parámetros que se utilizan para la interpolación geoestadística (*kriging*) (Senamhi, 2014). Estos parámetros definen el grado y escala de variación espacial y son el rango ( $A$ ), *nugget* ( $C_0$ ), *sill* ( $C_0+C$ ) (Kumar y Sinha, 2018).

El rango ( $A$ ) es la distancia a la que la semivarianza deja de aumentar, indica la distancia a partir de la cual las muestras son espacialmente independientes y representa el tamaño de mancha de la variable. El *nugget* ( $C_0$ ) representa la varianza no explicada por el modelo y se calcula como la intercepción con el eje Y. La máxima semivarianza encontrada entre pares de puntos se conoce como *sill* y debe coincidir con la varianza de la población (Bogunovic *et al.* 2014).

Para el ajuste del semivariograma se probaron los modelos gaussiano, esférico y exponencial que según Gallardo (2006), se encuentran entre los más empleados. El modelo se ajustó bajo el criterio de minimizar la suma del cuadrado de los errores (Bivand *et al.* 2008) según la ecuación 6:

$$\sum_{j=1}^P w_j (\gamma(h) - \hat{\gamma}(h))^2 \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde:

$\gamma(h)$ : valor según el modelo paramétrico

$w_j$ : pesos empleados para el ajuste (Tabla III) (Bivand *et al.* 2008).

**Tabla III.** Peso para cada método de ajuste utilizado.

Método de ajuste	Peso ( $W_j$ )
------------------	----------------

Método de ajuste	Peso (W <sub>j</sub> )
6	1
7	N <sub>j</sub> /h <sub>j</sub> <sup>2</sup>

N<sub>j</sub>: Número de pares a la distancia h<sub>j</sub>

γ: Semivariograma;

6: Estimación por mínimos cuadrados ordinarios (OLS).

7: Estimación por mínimos cuadrados ponderados (WLS).

Los datos de fósforo asimilable del suelo se ajustaron al modelo Exponencial (WLS1), según la ecuación 7.

$$\gamma(h) = S [1 - \exp(-3h/a)]$$

para  $h \geq 0$  (Ec 7)

Donde:

γ(h): semivarianza en el intervalo de distancia h

a: rango (A).

Este modelo tiene un comportamiento lineal a distancias de separación pequeñas cerca del origen, pero se va aplanando a mayores distancias y alcanza el sill en a.

### 3.4.3 Predicción espacial del fósforo asimilable del suelo como indicador de procesos de soporte y servicios ecosistémicos.

El método de interpolación geoestadística *Kriging* se basa en la dependencia espacial de la variable y, mediante un ajuste por regresión, interpola valores para lugares no medidos con variancia mínima (Charlotte *et al.* 2014).

El estimador debe ser una combinación lineal ponderada (promedio ponderado) de los datos (ecuación 8)

$$Z^*(x_0) = a + \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} Z(x_{\alpha}), \quad (\text{Ec. 8})$$

Donde:

x<sub>0</sub>: sitio donde se busca tener una estimación

{x<sub>a</sub>, a = 1... n}: sitios con datos, mientras que los ponderadores {λ<sub>a</sub>, a = 1... n} y el coeficiente a son las incógnitas del problema de *Kriging*.

La técnica de interpolación del contenido de fósforo asimilable del suelo en el agrosistema de la caña de azúcar evaluado, fue *Kriging* Ordinario, la cual tiene como base un componente aleatorio espacialmente correlacionado (Castro *et*

al. 2017). Esta selección se basó en el tipo de dato, el objetivo perseguido con el análisis, la complejidad de cada técnica y sus usos en diversos trabajos publicados en literaturas científicas (Bogunovic *et al.* 2018).

La ecuación de *Kriging* Ordinario (Ec. 9) se basa en la predicción espacial lineal óptima, donde la media desconocida del proceso al azar se estima a través del mejor estimador lineal insesgado (Senamhi, 2014).

$$\hat{Z}(S_i) = \sum_{j=1}^n w_{ij} Z(S_j) \quad (\text{Ec. 9})$$

Donde:

$\hat{Z}(S_i)$  es el valor estimado en la localidad  $S_i$ .

Este método de predicción espacial se fundamenta en la minimización del error cuadrático medio. Se caracteriza por reducir al mínimo la varianza de error, considerar la correlación espacial y ser insesgado. Esta última restricción consiste en expresar que el error de estimación tiene esperanza nula (Emery, 2013).

#### **3.4.4 Validación cruzada.**

La validación del modelo se utiliza para comprobar el efecto de las decisiones tomadas en los métodos de interpolación de la variable. Este procedimiento se utiliza como señal de aviso; donde se identifican y determinan aspectos negativos, como en errores excesivos entre valores observados y predicciones (Gallardo, 2006).

En este estudio se utilizó el método de validación cruzada para verificar la adecuación entre los datos y los parámetros adoptados, evaluar la eficacia y error de los mapas de predicción (Bhunja *et al.* 2018) del fósforo asimilable del suelo en el área evaluada.

Esta técnica de evaluación consiste en excluir la observación de uno de los puntos muestrales y con los  $n-1$  valores restantes se predice el valor de la variable en estudio en la ubicación del punto que se excluyó. Este procedimiento se realiza en forma secuencial con cada uno de los puntos muestrales y de esta manera, se obtiene un conjunto de “errores de predicción” (Senamhi, 2014). Permite calcular el error de la estimación en cada sitio con dato y realizar un análisis estadístico de los errores cometidos en estos sitios (Emery, 2013).

La varianza de *Kriging* Ordinario (varianza del error cometido en el sitio  $x_0$ ) se expresa según la ecuación 10.

$$\begin{aligned}\sigma_{KO}^2(\mathbf{x}_0) &= \sigma^2 - \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} C(\mathbf{x}_{\alpha} - \mathbf{x}_0) - \mu \\ &= \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} \gamma(\mathbf{x}_{\alpha} - \mathbf{x}_0) - \mu\end{aligned}\quad (\text{Ec. 10})$$

Donde:

$s^2 = C(0)$ : varianza *a priori* de la función aleatoria  $Z$ , es decir, la meseta de su semivariograma.

El procedimiento seguido en la técnica de validación cruzada permite la determinación de medidas de precisión como la raíz del error cuadrático medio y el coeficiente de determinación  $R^2$  (Senamhi, 2014). Según Bhunia *et al.* (2018), la raíz cuadrada del error medio (RMSE) y el error medio (ME) del modelo constituyen parámetros utilizados para esta evaluación (ecuaciones 11 y 12, respectivamente).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [Z(x_i) - Z^*(x_i)]^2} \quad (\text{Ec. 11})$$

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [Z(x_i) - Z^*(x_i)] \quad (\text{Ec. 12})$$

### 3.5 Análisis de conflictos en el agrosistema azucarero.

La existencia de diferentes categorías de fósforo asimilable del suelo dentro de un mismo campo de caña de azúcar, encontrada en esta investigación para el agrosistema azucarero; fue utilizada para la valoración del impacto de las variabilidades espaciales.

Se identificó la falta de correspondencia entre los sitios específicos por la dinámica espacial del fósforo asimilable del suelo y las estructuras impuestas para establecer las unidades mínimas de manejo.

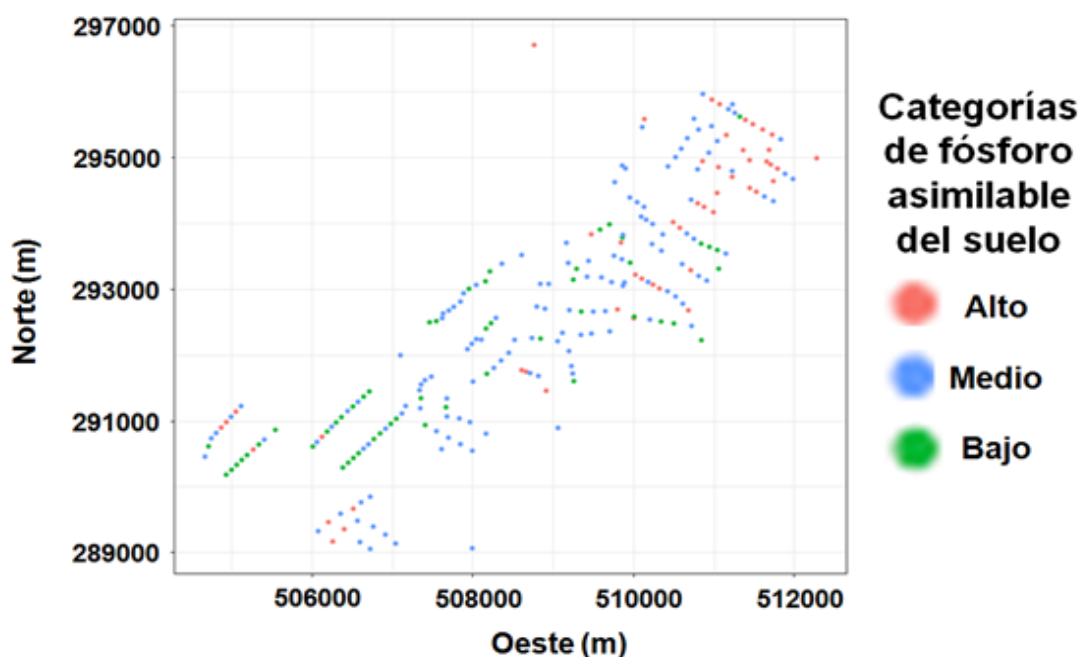
Se calculó un impacto marginal, a partir de las diferencias entre la aplicación de una dosis única (obtenida de la zona más representativa) para el campo de caña de azúcar y las necesidades detectadas en el análisis geoestadístico.

#### 4. Resultados y Discusión.

El estudio de las variables en su dimensión espacial conlleva la aplicación de diferentes métodos estadísticos para procesar la información obtenida que va desde los análisis exploratorios, hasta la interpolación para predecir un comportamiento regional (García y Orozco, 2021).

##### 4.1 Análisis exploratorio de los datos de fósforo asimilable del suelo.

El mapa del contenido de fósforo asimilable del suelo en los puntos muestreados (figura 4) permite conocer de manera general, el comportamiento de la variable estudiada por categorías de suelo para este nutriente en el agrosistema azucarero. Reconoce valores muy altos (mayores a 13 mg  $P_2O_5/100g$ ) y valores bajos (menores a 1.2 mg  $P_2O_5/100g$ ) del elemento en el suelo.



**Figura 4.** Mapa del contenido de fósforo asimilable del suelo en los puntos muestreados a la profundidad de 0 a 20 cm.

Conocer los valores de las muestras de suelo y los análisis porcentuales de cada nivel crítico al cual se asocian, es un componente importante del monitoreo del agrosistema azucarero. Más para lograr un manejo adecuado, en respuesta de la descripción obtenida, se necesita de la incorporación de la dimensión espacio. Para ello hay que interpolar de valores puntuales a zonas de manejo.



La descripción estadística de la variable muestra que los datos muestran dispersión con respecto a la media, con un coeficiente de variación de 87,4 % (tabla IV), lo que permite inferir que existe heterogeneidad en el suelo respecto a este elemento. Varios factores determinan esta variabilidad, donde han sido muestreadas diferentes unidades mínimas de manejos, cada una sometida al monocultivo de la caña de azúcar y a diferentes dosis de fertilizantes, acorde a sus propiedades químicas.

En este sentido; Logsdon y Cole (2018), plantean que el paisaje y los manejos pueden generar cantidades desiguales de nutrientes en el suelo dentro de los campos de cultivo. Esta afirmación coincide con Piotrowska *et al.* (2019), que afirman que aunque los suelos presenten el mismo origen, estos difieren en sus propiedades físicas y químicas.

**Tabla IV.** Descripción estadística de los datos.

Variable	Fósforo asimilable del suelo
Cantidad de muestras de suelos	241
Media (mg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /100g)	2,68
Desviación estándar	2,34
Coeficiente de variación (%)	87,4

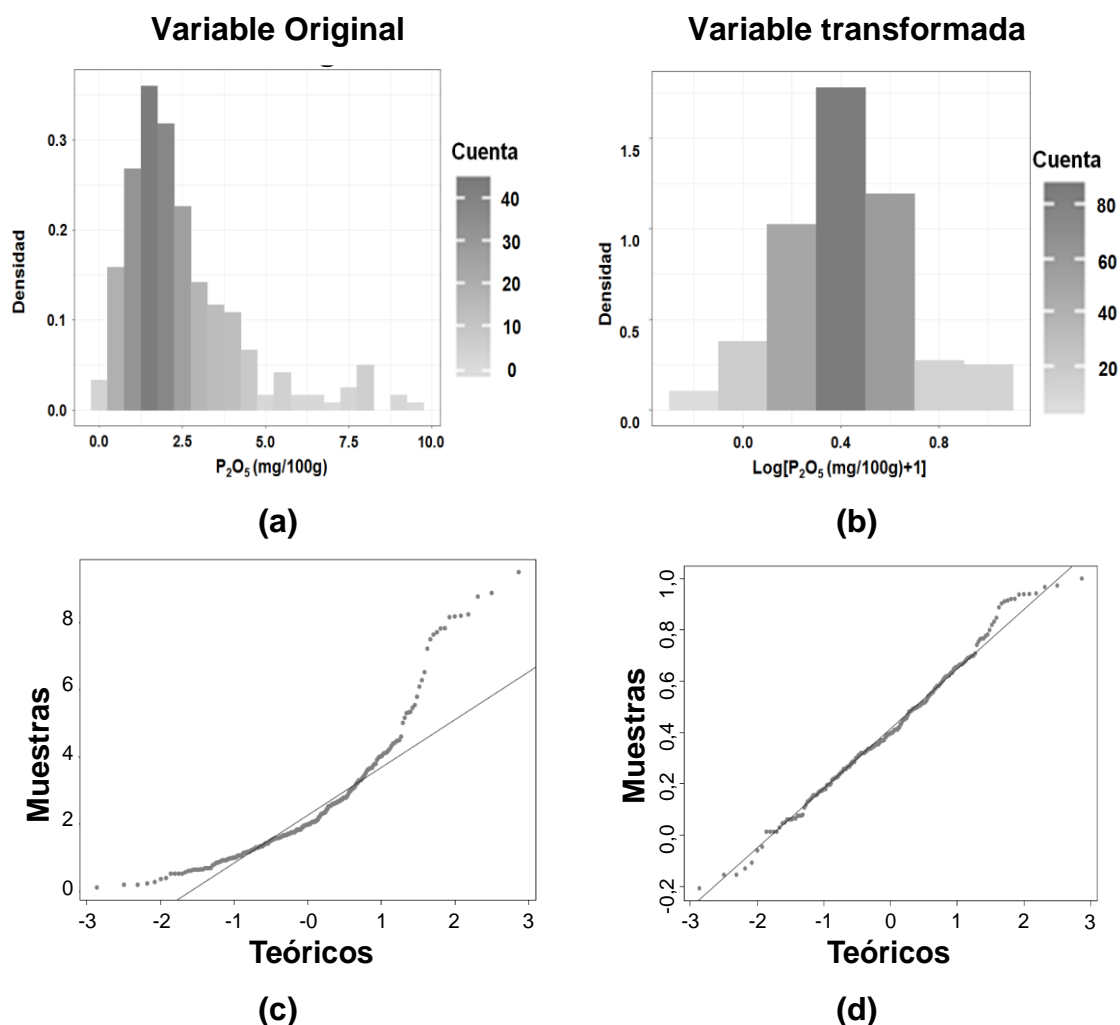
#### 4.1.1 Normalidad de los datos.

Al realizar la prueba de *Lilliefors* (tabla V) a los valores de fósforo asimilable del suelo, se comprobó que los datos originales no se ajustan a una distribución normal. Para el caso de los valores transformados se obtuvo *p-value* de 0,35; lo que demuestra mejoría respecto a los valores sin transformar. Resultado similar fue encontrado por Vasu *et al.* (2017) para diferentes propiedades del suelo incluido el fósforo disponible.

**Tabla V.** Prueba de normalidad de *Lilliefors*.

Variable	Nº de muestras	Coef. Asimetría	Coef. Kurtosis	<i>Lilliefors</i>	Sig.
Fósforo asimilable (ppm)	241	3,2	16,4	0,17	2.2 e <sup>-16</sup>
Transformada de los datos [log (p <sub>2</sub> O <sub>5</sub> +1)]	241	-0,1	0,6	0,04	0.35

Los histogramas de frecuencia de los datos de fósforo asimilable del suelo (figuras 5 a y b) muestran un comportamiento asimétrico en la variable original (5.2 a), que corresponde a su falta de ajuste a una distribución normal, con un cambio en su comportamiento posterior a la transformación logarítmica (5 b). Los gráficos cuartil – cuartil ratifican estos resultados (figura 5 c y d).



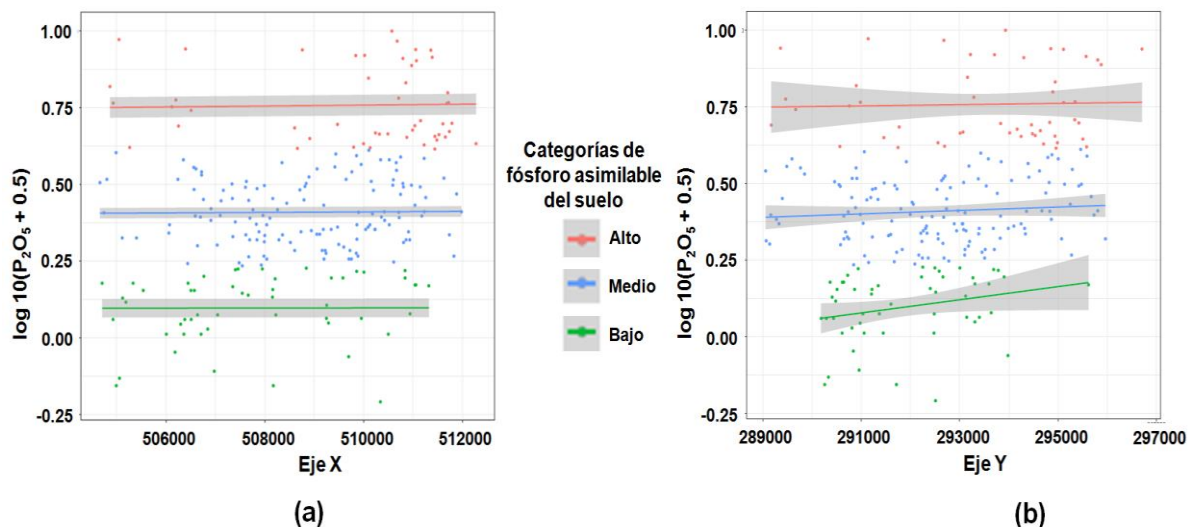
**Figura 5.** Histogramas de frecuencia (a y b) y gráficos cuartil – cuartil (c y d) de la variable antes y después de la transformación logarítmica.

Para el análisis geoestadístico que se realiza posteriormente, se modela con la transformación logarítmica, que presenta una distribución normal, lo que coincide con el desarrollo de los trabajos de otros autores (Bogunovic *et al.*, 2014).

#### 4.1.2 Análisis de tendencias.

Identificar tendencias de la variable por cada coordenada (este – oeste y norte – sur), constituye una primera aproximación para el entendimiento regional del

fósforo asimilable del suelo. En este caso se desagregaron los datos por categorías del nutriente evaluado, donde el comportamiento de la variable evaluada muestra poca relación con respecto a las coordenadas en el agrosistema azucarero (figura 6 a y b).

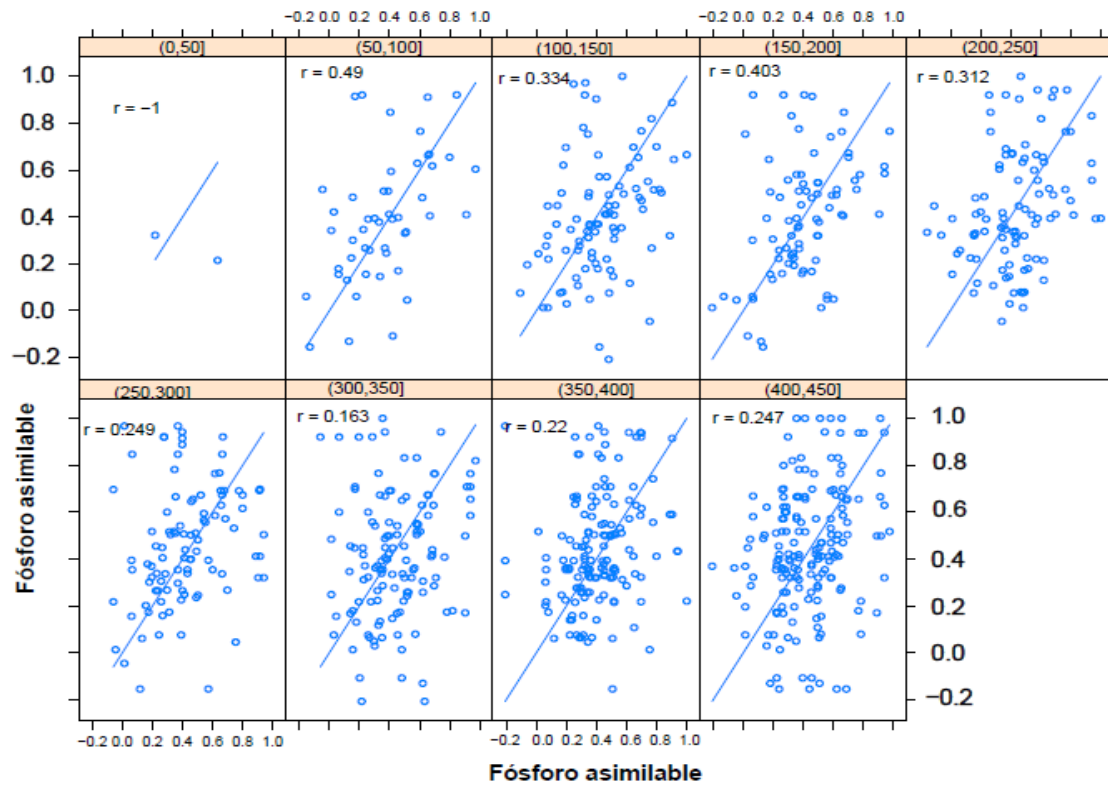


**Figura 6.** Relación entre los valores del fósforo asimilable del suelo y las coordenadas este – oeste (a) y norte – sur (b).

#### 4.2 Análisis estructural de los datos de fósforo asimilable del suelo.

Entender asociaciones espaciales de nutrientes del suelo mediante métodos clásicos y geoestadísticos permite desarrollar prácticas de manejos por sitios específicos en la agricultura (Bhunia *et al.* 2018). A diferencia de la estadística clásica, en la geoestadística cada variable, además de su valor intrínseco, tiene una posición en el espacio, que determina una relación entre la propia variable hasta una distancia máxima que debe ser encontrada.

En el análisis estructural del fósforo asimilable del suelo, un aspecto básico es determinar la relación entre pares de valores a diferentes distancias, donde se encontró el mayor valor de correlación en el intervalo de distancia de 50 a 100 metros (figura 7). Esta exploración provee los elementos para el ajuste del semivariograma, permite analizar las distancias de máxima correlación y proponer valores para los sitios no muestreado en los campos (Tola *et al.* 2017).



**Figura 7.** Correlación entre pares de la variable: fósforo asimilable del suelo, a diferentes distancias.

#### 4.2.1 Ajuste de modelos para la obtención del semivariograma experimental.

Para el ajuste del semivariograma experimental del fósforo asimilable del suelo en el agrosistema azucarero, fueron probados diferentes modelos (tabla VI), donde se seleccionó el modelo exponencial, que presentó el menor error de la suma de cuadrados y el mayor coeficiente de correlación tras la validación cruzada. La selección de este modelo para este elemento coincide con Bogunovic *et al.* (2014) y Sankar *et al.* (2018).

**Tabla VI.** Modelos probados para el ajuste del semivariograma y parámetros del ajuste.

Modelo teórico	Método	Nugget	Sill parcial	Rango	Sill	SCE	RMSE	MSE	R*	MSDR
Exponencial 7 <sup>1</sup>	WLS 7	0,032	0,016	237,07	0,048	1,41E-07	0,211	0,045	0,502	1,007
Exponencial 6	OLS	0,039	0,028	2916,6	0,067	2,46E-04	0,212	0,045	0,480	1,006
Esférico 7	WLS 7	0,032	0,014	434,55	0,047	1,64E-07	0,217	0,047	0,479	1,072

Modelo teórico	Método	Nugget	Sill parcial	Rango	Sill	SCE	RMSE	MSE	R*	MSDR
Esférico 6	OLS	0,036	0,013	826,17	0,049	2,68E-04	0,212	0,045	0,490	1,015
Gaussiano 7	WLS 7	0,035	0,012	224,04	0,047	1,59E-07	0,216	0,047	0,484	1,063
Gaussiano 6	OLS	0,037	0,011	372,45	0,049	2,74E-04	0,212	0,045	0,490	1,017

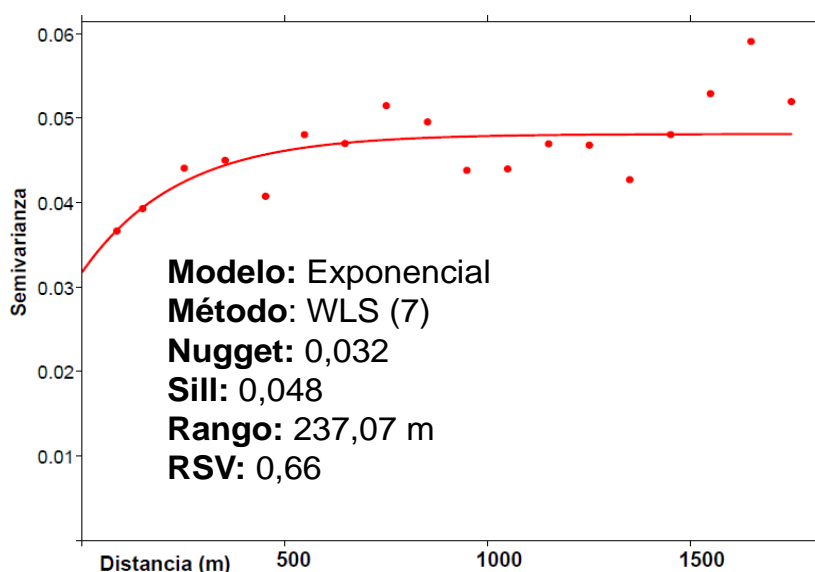
\* Significancia que el valor de la probabilidad es menor que 0,05

<sup>1</sup> Modelo ajustado a los datos de fósforo asimilable del suelo

SCE: Suma de cuadrados del error; RMSE: Raíz de la media de los errores al cuadrado; MSE: Cuadrado medio del error de predicción; MSDR: Cuadrado medio de las desviaciones

Los valores de correlación entre la variable observada y los valores predichos por el modelo, no son elevados (Tabla VI), lo cual coincide Guan *et al.* (2017), y se corresponden con los muestreos de suelo no probabilísticos (Veronesi *et al.* 2014).

El semivariograma constituye una herramienta cuantitativa simple y potente para la valoración espacial de variabilidades (Paterson *et al.* 2018). El rango, así como los parámetros *sill*, *nugget*, proveen mayor o menor ajuste a la predicción espacial mediante *Kriging* Ordinario. Para el fósforo asimilable del suelo en el agrosistema azucarero evaluado el semivariograma experimental con el modelo exponencial ajustado, obtiene un rango de 237,07 m (figura 8), lo cual significa que las muestras dejan de estar correlacionadas a partir de esta distancia, para el elemento evaluado.



**Figura 8.** Semivariograma confeccionado a partir de los datos de fósforo asimilable del suelo y el modelo ajustado.

Se han obtenido varios rangos por otros autores, Bogunovic *et al.* (2014) obtuvo un valor de 201,1 m; Fu *et al.* (2010) con un modelo esférico halló un valor de 264 m, mientras que Vasu *et al.* (2017) determinó 1 160 m para este elemento.

Es evidente que existe variabilidad en los resultados obtenidos por varios los diferentes autores. Esta divergencia se debe a diferentes factores; según Gallardo (2006), la naturaleza de los datos, es decir, la forma en que son colectados, puede incidir en diferentes patrones espaciales. Los manejos agrícolas realizados son un aspecto a considerar para áreas monocultivadas con caña de azúcar, que presentan labores como la fertilización por surcos en una dirección dentro de los límites de las unidades mínimas de manejo.

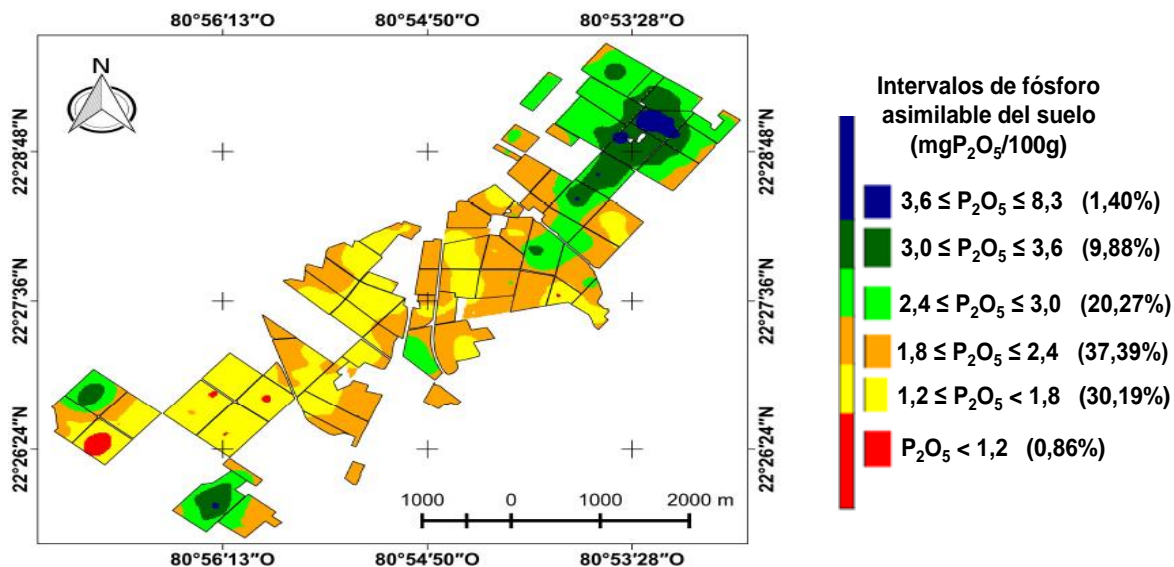
#### **4.2.2 Predicción espacial del fósforo asimilable del suelo en el agrosistema azucarero.**

La asociación de muestras de suelo con las coordenadas geográficas posibilita la obtención de mapas que muestren la heterogeneidad del suelo respecto a indicadores químicos de fertilidad (Resende y Coelho, 2014). Estos mapas delimitan sitios específicos para cada categoría de suelo, lo cual permite identificar dónde existen afectaciones en los niveles de nutrientes, servicio de soporte imprescindible para mantener el agrosistema. Pueden revelar relaciones espaciales y contribuir a propuestas de valoraciones de riesgos como base para los procesos de toma de decisiones (Bednářová *et al.* 2016).

El fósforo asimilable del suelo influye en varios procesos de desarrollo de la caña de azúcar, como se refiere en el epígrafe 2.4.1. Conocer su contenido y los análisis porcentuales de cada nivel crítico al cual se asocian, es un componente importante para el monitoreo del agrosistema azucarero. El conocimiento de dinámicas espaciales del nutriente en el área de interés se requiere para contribuir a la sostenibilidad del suelo, a partir de planificar por sitios específicos un adecuado manejo de nutrientes para el cultivo (Rosemary *et al.* 2017).

Los resultados de la predicción espacial del fósforo asimilable del suelo, por el método de *Kriging* Ordinario para la región evaluada (figura 9), arrojan que 0.86 % del área presenta categoría de bajo para este elemento, 97.74 % un nivel medio y 1.4 % alto, según las categorías empleadas en el Servicio de Recomendación de Fertilizantes y Enmiendas (SERFE, 2014). Este mapa

constituye una herramienta para la toma de decisiones, donde se muestra la vulnerabilidad de cada unidad mínima de manejo del agrosistema ante la fertilización, que no se adecua a la variabilidad espacial del fósforo asimilable del suelo.



**Figura 9.** Predicción espacial del fósforo asimilable del suelo por el método de *Kriging Ordinario*.

El estudio de la variabilidad espacial de propiedades del suelo permite identificar sitios específicos dentro del área evaluada, que se pueden utilizar para adecuar las prácticas de manejos. Este procedimiento posibilita alcanzar mayores rendimientos del cultivo (servicio de provisión) a la vez que se garantiza el mantenimiento de fertilidad del suelo respecto al nutriente en cuestión (proceso de soporte).

Tras la cosecha de la caña de azúcar parte de los nutrientes extraídos del suelo se pierden (entre 0.4 y 0.6 kilogramos de fósforo por toneladas de caña de azúcar) y sólo la fracción de los residuos de cosecha permanece en el campo (Cuellar *et al.* 2003). En ese contexto, un manejo de mayor precisión debe incrementar el grado de detalle en la información sobre las condiciones del suelo. Por tanto, el monitoreo de su estado nutricional es la base para la toma de decisiones inteligentes, que propicien sostenibilidad de los agrosistemas. Pues la reposición de los nutrientes del suelo, contribuye a mitigar los conflictos entre la provisión sostenida de caña de azúcar en el

agrosistema y las pérdidas en las reservas de elementos esenciales, soporte en la generación de los servicios ecosistémicos.

#### **4.2.3 Validación de la interpolación.**

Es cierto que la identificación de heterogeneidad espacial de las propiedades del suelo es un requisito para el manejo adaptado a estas variabilidades. Sin embargo, es importante destacar que la escala escogida para el estudio, es responsable de la identificación de variabilidad que se logre realizar, pues a menor escala más variabilidades se identifican, pero se encarecen los costos económicos.

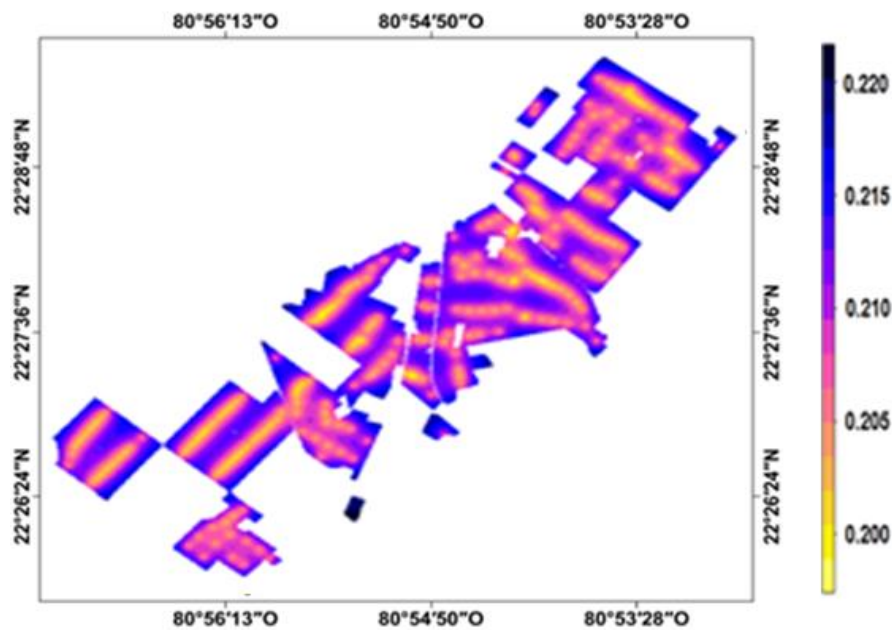
Es por esta razón que a pesar de la valiosa información que se genera en las interpolaciones para aumentar el entendimiento del estado de las variables en los agrosistemas, la principal limitante es el alto número de muestras requeridas para desarrollar los análisis geo-estadísticos (Henríquez *et al.* 2005).

En este sentido, sería prudente investigar la cantidad máxima de muestras de suelo por hectáreas, que es económicamente factible tomar para que los estudios del suelo, como recurso indispensable para la sostenibilidad de los agrosistemas, se realicen con el rigor que requieren este tipo de análisis. Pues en este trabajo se tomó como base una escala de 5 ha para realizar el muestreo con rigor para la investigación; pero en la práctica, no se conoce el número de muestras por hectáreas ideal para estos estudios.

Para este estudio, la predicción espacial del fósforo asimilable del suelo (figura 9) evidenció la existencia de variabilidades dentro de las unidades mínimas de manejo. Además el valor del *nugget* encontrado en el semivariograma (figura 8) por encima del origen de coordenada, revela la posible existencia de variabilidades por debajo de la escala muestreada (Gallardo, 2006).

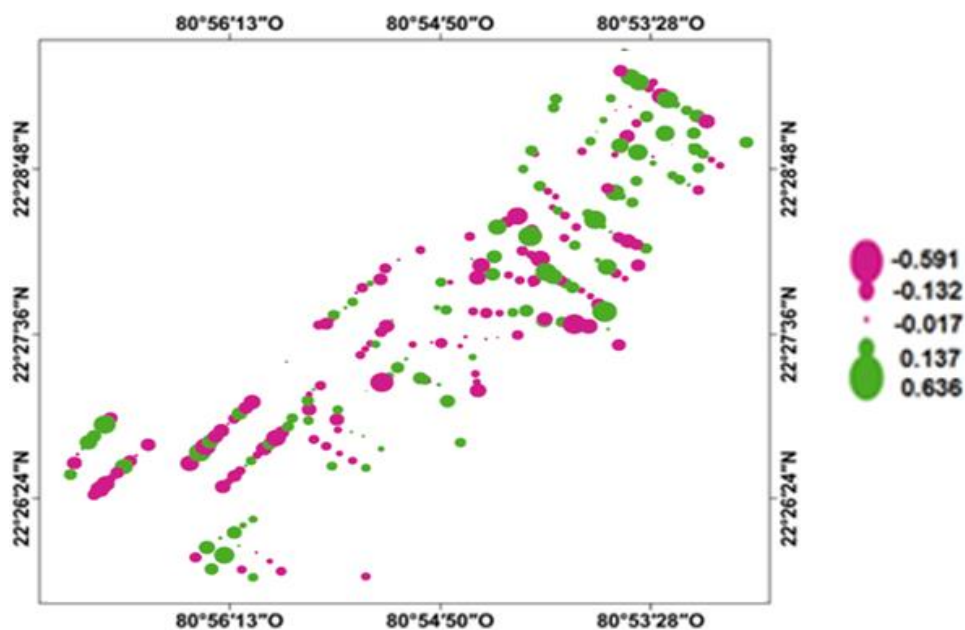
Dicha predicción presenta un error asociado, que aumenta a medida que se aleja del punto de muestreo (figura 10). Sin embargo, como se observó en epígrafes anteriores, el modelo exponencial al que se ajustó el semivariograma y que rige la predicción espacial, presentó un buen ajuste para la variable estudiada, pues los parámetros del ajuste mostraron valores acertados.





**Figura 10.** Desviación estándar

Del mismo modo, en la figura 11 se muestra el error asociado a la validación cruzada en cada punto de la predicción espacial del fósforo asimilable del suelo, para el agrosistema azucarero evaluado en este estudio.



**Figura 11.** Validación de residuales

### 4.3 Análisis de conflictos espaciales en el agrosistema azucarero.

El concepto de sostenibilidad implica el mantenimiento de las funciones y servicios ecosistémicos de los agrosistemas en el tiempo, de manera que se garantice la existencia de un suelo fértil para futuras generaciones, donde son

fundamentales sus propiedades. Según Thompson (2021) la sostenibilidad, con respecto a los sistemas agrícolas, se refiere al mantenimiento de la fertilidad del suelo, la diversidad y vitalidad de los procesos ecológicos.

Modelar las propiedades de este recurso es un desafío; sus valores son resultado de la compleja interacción entre factores ambientales y manejos antrópicos en el tiempo (Paterson *et al.* 2018), que provocan transformaciones de manera progresiva.

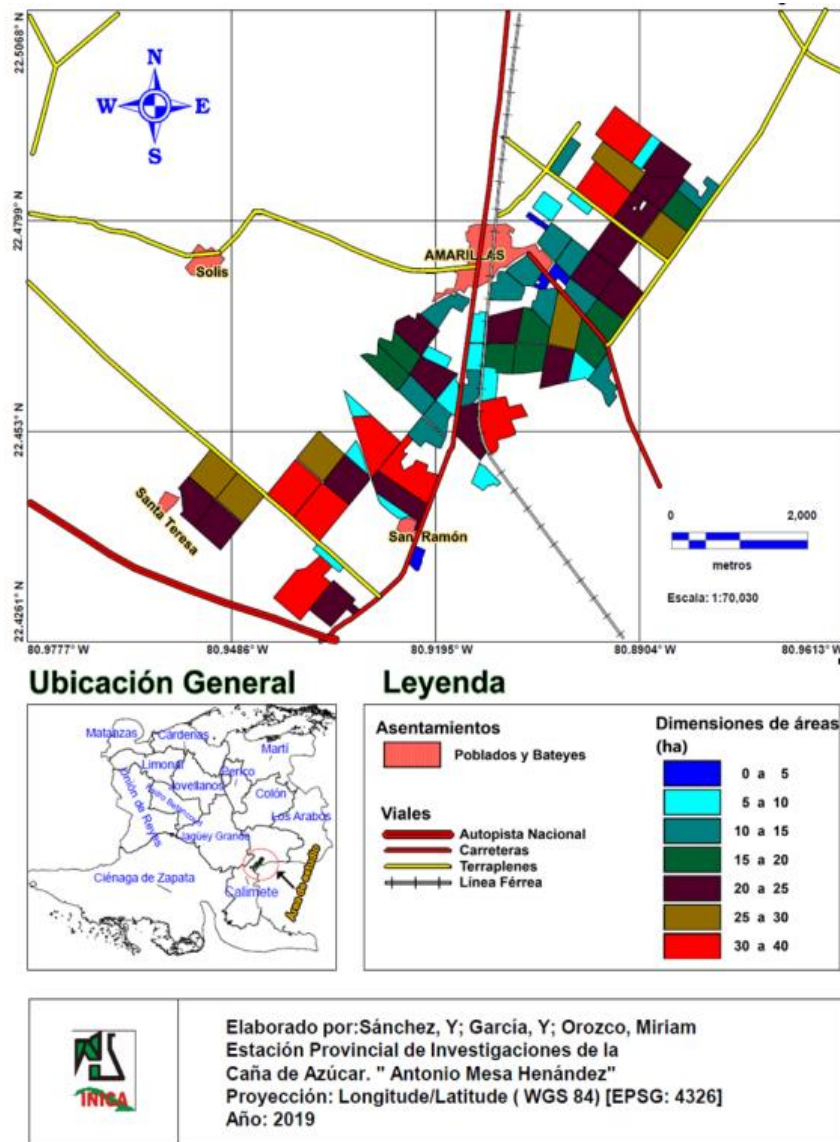
Para contribuir al manejo sostenible del agrosistema es vital realizar análisis de conflictos, estrechamente relacionado con el uso del suelo, para que tomadores de decisión puedan entender mejor las consecuencias de diferentes elecciones y seleccionar las mejores a largo plazo (Xiangzheng *et al.* 2016). La evaluación de conflictos dependerá de la elección de diversos indicadores (González *et al.* 2015).

En este estudio, el análisis geoestadístico del fósforo asimilable del suelo, permitió descubrir diferentes conflictos en el agrosistema azucarero evaluado. En la medida en que se solucionen estos conflictos, asociados a variabilidades existentes, se contribuirá a la sostenibilidad del agrosistema azucarero. Pues la degradación de este bien, con la disminución de sus niveles (respecto a sus propiedades), requiere una cuantía mayor de fertilizantes para su mantenimiento en el tiempo y el desconocimiento de esos aspectos, deviene en disminuciones de los beneficios a obtener (servicios ecosistémicos). Según Cuellar *et al.* (2003), sin aplicaciones de fertilizantes, no es posible garantizar en muchos casos una nutrición balanceada a cultivos de elevadas producciones de biomasa.

#### **4.3.1 Diferencia entre las áreas de las unidades mínimas de manejos.**

Desde los análisis realizados en los epígrafes anteriores se identifican diferentes conflictos dentro de los manejos para alcanzar los beneficios requeridos. Un primer aspecto asociado a conflictos espaciales es la diferencia que existe entre las áreas de las unidades mínimas de manejo, que varían desde 2.42 ha hasta 38.22 ha (figura 12), lo que supone un problema entre el manejo de nutrientes y atenciones culturales en los campos de caña de azúcar. Pues, mientras mayor es el área de la unidad mínima de manejo, menos representativa es la muestra de suelo compuesta por la cual se rige la recomendación de fertilizantes minerales, lo que implica un mayor error

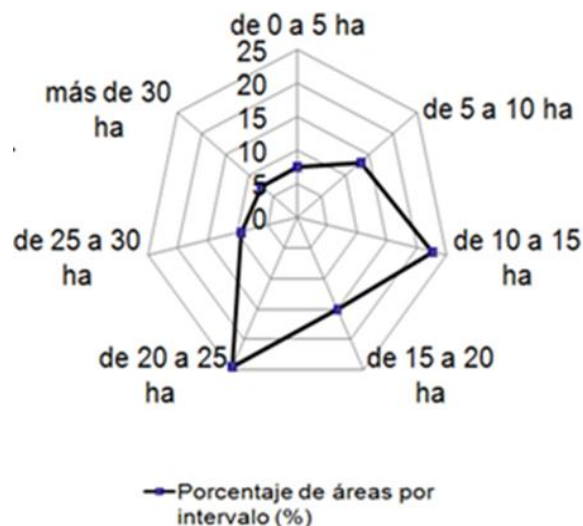
asociado a la aplicación de dosis única a todo el campo del cultivo. Es decir, el proceso de fertilización mineral comienza con la toma de muestras de suelo, que se realiza por la diagonal del campo, para formar una muestra compuesta por cada unidad mínima de manejo. Por lo tanto, para el adecuado manejo de la fertilidad del suelo se necesitan dimensiones más pequeñas, que permitan identificar la variabilidad espacial de las propiedades del suelo, a la menor escala económicamente factible.



**Figura 12.** Dimensiones de las unidades mínimas de manejos

Por otro lado es conveniente que las áreas de los campos sean mayores, con el objetivo de explotar al máximo el uso de la mecanización, ahorrar combustibles y energía. Para el caso de estudio, el 42.8 % del agrosistema azucarero está estructurado en unidades mínimas de manejo con un área

agrícola superior a 20 ha (figura 13), que favorecen actividades agrícolas donde es conveniente que los bloques de caña de azúcar sean compactos y de mayores dimensiones. Esto se convierte en una contradicción de manejo: hacia un lado mayores áreas compactas y hacia el otro, reducción de las mismas.



**Figura 13.** Intervalos de áreas en que se encuentran las unidades mínimas de manejos en el área evaluada

El problema radica en que las acciones para obtener las codiciadas ganancias económicas a corto plazo, deterioran progresivamente las propiedades del suelo y a largo plazo, provocan pérdidas irreparables, pues la restauración de este valioso recurso no ocurre en la escala de tiempo de vida humana.

#### **4.3.2 Falta de correspondencia entre comportamientos espaciales del fósforo asimilable del suelo y estructuras del agrosistema azucarero.**

El mapeo de la variabilidad espacial de propiedades del suelo dentro de las áreas cultivadas, permite definir intervenciones de manejo localizado (o sitio específico), que procura optimizar el uso de fertilizantes, de acuerdo con la demanda local del cultivo (Resende y Coelho, 2014). La identificación de sitios específicos dentro del campo de caña de azúcar es un elemento básico para la toma de decisiones donde, para que sean sostenibles, la reposición de nutrientes debe adaptarse a las características variables del suelo.

Monitorear las variables del suelo dentro de los manejos recomendados ayuda a explorar los cambios que pueden afectar a los servicios ecosistémicos (Birgé *et al.* 2016) y establecer así, las zonas y las recomendaciones específicas para mitigar las limitantes con criterios sostenibles. Lo que convierte a las

propiedades del suelo en características ambientales fundamentales asociadas al manejo del agrosistema azucarero. Sin embargo la propia aplicación de los fertilizantes se convierte en un conflicto por la carencia de equipos apropiados, que adapten sus aplicaciones a las condiciones variables previamente identificadas por la colecta, análisis de las muestras y estudio geoestadístico. Pues el manejo de fertilizantes del agrosistema azucarero se realiza tomando como referencia una única muestra compuesta (tomada por la diagonal del campo), donde se aplica una dosis de fertilizantes minerales (NPK) para toda la unidad mínima de manejo. Este procedimiento incurre en errores al no tener en cuenta la heterogeneidad dentro del campo para los nutrientes que son repuestos.

La predicción espacial del fósforo asimilable del suelo para este estudio, demostró la existencia de sitios específicos dentro de las unidades mínimas de manejo, que no coinciden con las estructuras creadas por la sociedad para el manejo de recursos (figura 9). Este hecho es fuente de conflicto; cuando no se disponen de los equipos apropiados para aplicaciones variables de fertilizantes. En el agrosistema azucarero se encontró que el 50 % de las unidades mínimas de manejo presentan 2 categorías de fósforo asimilable del suelo; 32,44 % tres y 2,70 % presentan cuatro categorías; teniendo sólo el 14,86 % de los campos de caña de azúcar un comportamiento homogéneo (una categoría) respecto a este elemento. Este resultado supone que el manejo de nutrientes no será efectivo en el 85,14 % de las unidades mínimas de manejo en el agrosistema azucarero evaluado, donde dejaría de adaptarse al menos a una categoría, que puede ser en exceso o déficit respecto a la necesidad real del suelo. Esto afecta los procesos de soporte y comprometen la sostenibilidad del agrosistema azucarero.

Una forma de solucionar esta dicotomía es la aplicación de fertilizantes por sitios específicos a partir de tecnologías para la fertilización que permitan aplicar dosis variables dentro de las unidades mínimas de manejo, donde la agricultura de precisión constituye una herramienta para mejorar la rentabilidad y sostenibilidad del agrosistema (Vanacht, 2014).

#### **4.4 Impacto asociado a la variabilidad espacial del fósforo asimilable del suelo en un campo de caña de azúcar.**

El monitoreo con análisis periódicos del suelo es necesario para mantener las concentraciones de fósforo en niveles que no excedan el rango requerido para la producción de cultivos (*International Plant Nutritional Institute* [IPNI], 2013). Se entienden por los diferentes sitios específicos identificados como las variabilidades existentes dentro de los campos de caña de azúcar; que sin los manejos adecuados ocasionan impactos en los procesos de soporte (asociados a propiedades del suelo).

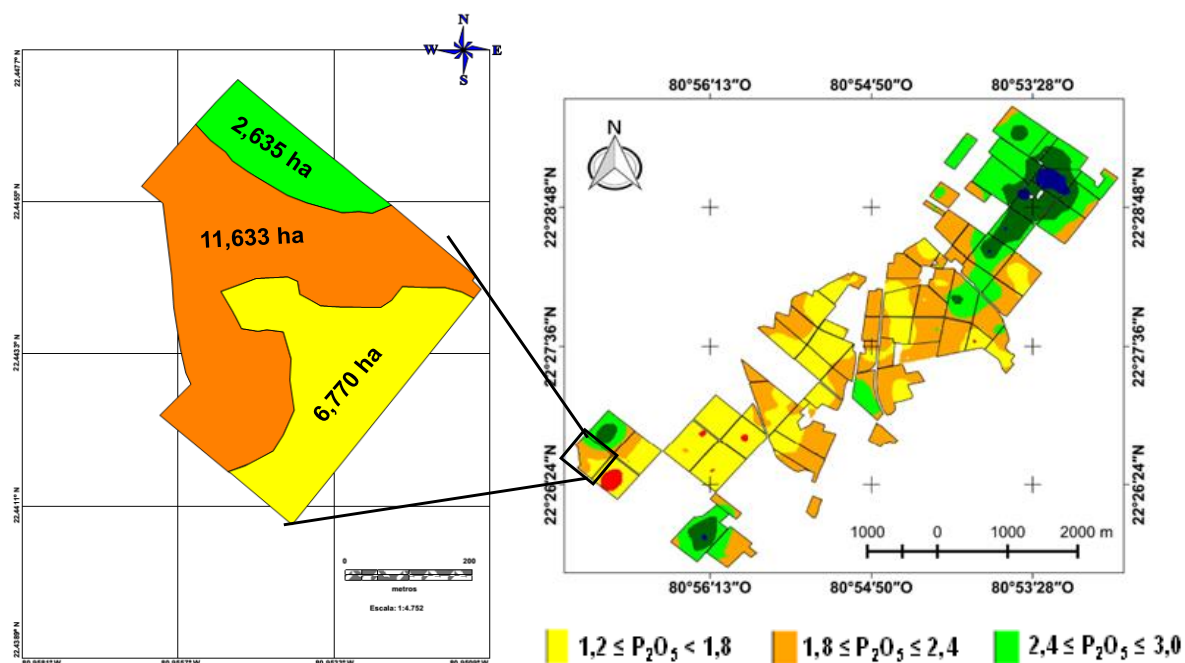
La valoración en términos económicos constituye una herramienta vital en la toma de decisiones. Es por ello que evidenciar causas y efectos ambientales en términos económicos puede contribuir al reconocimiento de servicios ecosistémicos desfavorecidos o no reconocidos en la economía tradicional. Pero la diversidad de variaciones, o sea, las complejas relaciones entre estructura, procesos y funciones de un agrosistema, impactado por diferentes manejos, abarca más que la unificación de todos sus términos en una unidad de medida común. Es por ello que estos procesos y los factores de cambio deben ser abordados desde la diversidad multiplicidad de valores asociados. Los valores de impactos desde el manejo de fertilizantes se relacionan con la productividad del proceso, pues implican impactos económicos y ambientales por excesos y déficit de fertilizantes; asociado a conflictos espaciales entre estructuras antrópicas y variabilidades naturales de nutrientes del suelo.

El estudio de impacto de la no adaptación de la fertilización mineral en un campo de caña de azúcar realizado en este trabajo, solo incluye una unidad mínima de manejo de 21,04 ha, que representa un 1,67 % del área de estudio y 0,19 % del área total de la UEB Jesús Rabí, que es de 10 741, 71 ha sembradas con caña de azúcar. Pues este estudio pretende reflejar un impacto marginal o perjuicio, con la intención de que se comprenda la importancia de su inclusión en la toma de decisiones.

El costo marginal expuesto recoge las necesidades que deben ser abastecidas por las restituciones de nutriente acorde a las necesidades del cultivo y el stock de nutriente del suelo. Es de destacar que la restitución del fósforo es uno de los manejos que se realizan para mantener la caña de azúcar y no corresponde un costo total de producción, pero si expresa una visión del proceso de soporte

desde un elemento esencial para este cultivo y debe ser considerado junto al resto de elementos esenciales y otros factores impulsores de cambio para llegar a mayores costos marginales, que reflejen toda la diversidad de factores relacionados con los servicios ecosistémicos en el agrosistema de la caña de azúcar.

La ausencia de tecnología de aplicaciones variables dentro de campo, implica aplicar una misma dosis de fertilizante, lo que ocasiona exceso o déficit, según criterio seleccionado, en el manejo. Una lógica de pensamiento para la dosis única, puede ser utilizar el área de mayor representatividad, que en este caso es la de 11,63 ha (figura 14) que corresponde al intervalo de 1,8 a 2,4 mg  $P_2O_5 \cdot 100g^{-1}$ .



**Figura 14.** Variabilidad del fósforo asimilable dentro de un campo de caña de azúcar.

Un manejo acorde a esta categoría significa que las áreas de color verde (figura 14) recibirían mayores dosis que las necesitadas (tabla VII). Según Pérez *et al.* (2015) las dosis para los tres intervalos expuestos (amarillo, naranja, verde), son de 50; 40 y 30 kg  $P_2O_5 \cdot ha^{-1}$  respectivamente.

De acuerdo con el criterio de variabilidad espacial del fósforo asimilable del suelo; el proceso de fertilización a partir de una dosis única implica, para este campo, incurriría en un exceso de 26,35 kg de SPT, lo que significa un costo de \$ 14 (USD) de más. Del mismo modo, se produce un déficit de 67,70 kg de

SPT (tabla VII), para el área evaluada de 21,04 ha. Solo 55,30 % del área recibiría la dosis adecuada acorde con la predicción geoestadística realizada para este elemento.

**Tabla VII.** Diferencias entre dosis variables y únicas de SPT en 21,04 ha de caña de azúcar

<b>Categorías</b>	<b>Área (ha)</b>	<b>% del área</b>	<b>Necesidades por zonas (kg/ha)</b>	<b>Portador** a aplicar (kg)</b>	<b>Dosis única* (kg)</b>	<b>Diferencia <sup>5</sup> (kg)</b>
Medio <sup>2</sup>	6,77	32,18	50	338,50	270,80	-67,70
Medio <sup>3</sup>	11,63	55,30	40*	465,32	465,32	0
Medio <sup>4</sup>	2,64	12,52	30	79,05	105,40	26,35

\* dosis única de 40 kg\*ha<sup>-1</sup>

\*\* portador superfosfato triple (SPT)

<sup>2,3,4</sup> aunque se consideran como categoría de medio, las necesidades de fósforo van de 50 kg\*ha<sup>-1</sup> a 30 kg\*ha<sup>-1</sup>

<sup>5</sup> los números negativos significan la carencia en la aplicación para el sitio específico que se identifica y los números positivos, exceso que se aplicaría. Solo el valor de 0 representa el área a la que se adecua la dosis a las necesidades presentes.

Según Cuellar *et al.* (2003), se requiere de aplicaciones de fertilizantes para garantizar una nutrición balanceada a cultivos de elevadas producciones de biomasa. La correcta determinación del estado de las propiedades del suelo y su gestión acorde a las necesidades reales del agrosistema, no sólo mitiga el efecto de elementos limitantes sobre el rendimiento, sino que evita el exceso de elementos inorgánicos y su carga contaminante hacia el ambiente.

Según Brussaard (2012), estas entradas deben actuar como refuerzo de los procesos naturales, optimizar los manejos agrícolas y ser en la justa medida. Sin embargo la propia aplicación del fertilizante, lo convierte en un conflicto en las condiciones existentes, con la carencia de la tecnología requerida para regular las dosis a las condiciones variables identificadas.

Lo encontrado evidencia que los manejos de nutrientes del suelo alejado de los criterios de sitios específicos implican excesos y déficit en las aplicaciones que



se realizan, conllevan entonces perjuicios económicos y ambientales, con consecuencias para los servicios ecosistémicos.

La aplicación de nutrientes químicos juega un rol vital en la productividad de los suelos, pues aumentan su fertilidad (Edwin y Muthu, 2021). Sin embargo un desbalance en la aplicación de fertilizantes reduce el uso eficiente de nutrientes con grandes costos de producción y ambientales (Rehman *et al.* 2019) y riesgos para la salud humana (Ahmed *et al.* 2017). La reincidencia de este fenómeno es una de las principales causas que reducen la biodiversidad del suelo y su fertilidad, con serios impactos sobre el balance ecológico (Meena *et al.* 2017).

Según Cuellar *et al.* (2003), el déficit en la aplicación de fertilizante, puede ocasionar impactos en el rendimiento del cultivo. Provoca retrasos en el crecimiento de la planta y de las raíces, coloración púrpura oscura de las hojas más viejas y el florecimiento. Además la carencia de fósforo puede ocasionar disminución de la fertilidad del suelo a largo plazo (IPNI, 2013)

Por otro lado, el exceso de nutrientes químicos puede modificar directa e indirectamente las propiedades físicas, químicas o biológicas del suelo y disminuir su fertilidad (Ge *et al.* 2018). Un exceso de fertilización fosfórica representa un gasto extra de recurso y puede ocasionar eutrofización de lagos y presas (Cuellar *et al.* 2003; García *et al.* 2009).

Este proceso es la respuesta de un cuerpo de agua al sobre-enriquecimiento de nutrientes fosfóricos, que provoca el crecimiento abundante de algas y otras plantas acuáticas, cuya descomposición requiere una alta cantidad de oxígeno, lo que provoca un déficit en el desarrollo de los peces y otras fuentes de vida acuáticas.

Otros efectos asociados a la aplicación excesiva de fertilizantes minerales fosfóricos en el suelo, es que en la fabricación de este producto, se incurre en efectos negativos sobre la salud humana (del personal relacionado con los procesos de obtención del fertilizante). Pues las rocas fosfóricas utilizadas en su elaboración contienen sulfuro de cadmio, que puede causar enfermedades crónicas: cardiovasculares, respiratorias, trastornos del hígado y los riñones. Además puede provocar un debilitamiento de los huesos por pérdida de calcio.

Como parte de un sistema, los elementos y propiedades del suelo se relacionan entre ellos, de manera que el desbalance de fósforo asimilable del suelo en el agrosistema azucarero, además interviene en la absorción de otros elementos, tales como el hierro, el manganeso y el zinc (IPNI, 2013). Según TEEB (2010), el mal manejo del suelo afecta los procesos de soporte que, como parte de sistemas dinámicos, conlleva a la disminución en la provisión de otros servicios generados en el agrosistema.

Los conflictos identificados en la región desencadenan una serie de impactos, que influyen en el agrosistema y la sociedad. Se producen pérdidas económicas por imprecisiones en el manejo de recursos, causado a su vez, por la falta de conocimiento sobre la variabilidad espacial de propiedades del suelo. Para esta problemática no existe una acción global (por el momento) que dé solución a las variabilidades presentes. Está claro que mayor número de muestras (que sean representativas) permiten realizar una mejor caracterización del suelo y de las necesidades de nutrientes presentes, para mantener su fertilidad y la producción del cultivo de la caña de azúcar; pero implica mayores gastos de diagnóstico.

Por lo expuesto anteriormente se considera que el proceso de la toma de decisiones debe considerar las determinaciones y consideraciones para establecer estrategias de corto, mediano y largo plazo. En el corto plazo actividades prácticas básicas pueden llevar a soluciones sinérgicas y en el largo plazo la investigación científica quía hacia prácticas más eficaces para enfrentar temas prioritarios de sostenibilidad; donde los impactos son altamente complejos, específicos por sitios y variables a través del tiempo (IPNI, 2013).

Según Khan (2021) el reconocimiento de los procesos de soporte es muy necesario para que la sociedad pueda apreciar la importancia de la estructura y procesos ecológicos, identificarlos contribuye a facilitar el manejo sostenible.

## **5. Conclusiones**

- Se demostró la existencia de variabilidad espacial del fósforo asimilable del suelo en el agrosistema azucarero, con la formación de sitios específicos incluso, dentro de las unidades mínimas de manejos.
- Para el ajuste del semivariograma se seleccionó el modelo exponencial, que presentó el menor error de la suma de cuadrados y reflejó que las muestras dejan de estar espacialmente correlacionadas a 237,07 metros de distancia, para el fósforo asimilable del suelo.
- Se demostró que la exclusión de la variabilidad del fósforo asimilable del suelo en las labores de fertilización, compromete la sostenibilidad del agrosistema azucarero.
- Se necesita de la incorporación de tecnologías que permitan la aplicación de dosis variables de fertilizantes, como manejo sostenible del suelo.

## **6. Recomendación**

Utilizar los criterios de geo-estadística y variabilidad espacial en la toma de decisiones para una agricultura de precisión en la UEB Jesús Rabí.

## 7. Bibliografía

- Adhikari, K. Hartemink, A. 2016. Linking soils to ecosystem services. A global review [en línea]. *Geoderma*, 262, pp. 101–111. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.009>. [Consulta: 1 de marzo 2016].
- Aguilar, Noé. Alejandro, Jorge. y Espinosa, Rubén. 2015. Evaluación EMERGY Y LCA en la agroindustria azucarera de Veracruz, México [en línea]. *Cultivos Tropicales*, Vol. 36, No. 4, pp. 144 – 157. Disponible en: <http://scielo.sld.cu/pdf/ctr/v36n4/ctr20415.pdf>. [Consulta: 15 de septiembre 2020]
- Ahmed M, Rauf M, Mukhtar Z, Saeed NA. 2017. Excessive use of nitrogenous fertilizers: an unawareness causing serious threats to environment and human health. *Environ Sci Pollut Res* [en línea] 24, pp. 26983 – 26987. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0589-7>. [Consulta: 29 de diciembre 2019].
- Álvares, S. Lomas, P. L. Martín, B. Rodríguez, M. y Montes, C. 2006. La síntesis emergética (“*emergy synthesis*”) [en línea]. Integrando energía, ecología y economía, Publicaciones de la Fundación Interuniversitaria Fernando González Bernáldez, Madrid, España. Disponible en: [http://www.ehu.es/cdsea/web/rm\\_documents/Milenio/docum\\_entregada/Emergetica\\_Pedro\\_Lomas.pdf](http://www.ehu.es/cdsea/web/rm_documents/Milenio/docum_entregada/Emergetica_Pedro_Lomas.pdf). [Consulta: 2 de octubre 2015].
- Andrade, A. Arguedas, S. Vides, R. 2011. Guía para la aplicación y monitoreo del Enfoque Ecosistémico [en línea] CEM-UICN, CI-Colombia, ELAP-UCI, FCBC, UNESCO – Programa MAB, 42 p. Disponible en: [http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/FIELD/Montevideo/pdf/Guia\\_para\\_implementar\\_y\\_monitorear\\_el\\_EE\\_2011.pdf](http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/FIELD/Montevideo/pdf/Guia_para_implementar_y_monitorear_el_EE_2011.pdf). [Consulta: 15 de septiembre 2018]
- Balvanera, P y Helena, H. 2007. Los servicios ecosistémicos y la toma de decisiones: retos y perspectivas [en línea]. *Gaceta ecológica*, número especial, pp. 84 – 85. Instituto Nacional de Ecología. México. Disponible en: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/gacetitas/523/decisiones.pdf>. [Consulta: 15 de septiembre 2019]

- Bednářová Z, Kalina J, Hájek O, Sáňka M, Komprdová K. 2016. Spatial distribution and risk assessment of metals in agricultural soils. [en línea]. Geoderma, 284, pp. 113 – 121. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.08.021>. [Consulta: 20 de febrero 2018].
- Bhunia, G. Kumar, P. Chattopadhyay, R. 2018. Assessment of spatial variability of soil properties using geostatistical approach of lateritic soil (West Bengal, India) [en línea]. Annals of Agrarian Science, 16, pp. 436 – 443. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.aasci.2018.06.003>. [Consulta: 15 de septiembre 2020]
- Birge E, Bevans A, Allen R, Angeler G, Baer G, Wall H. 2016. Adaptive management for soil eco system services. Journal of Environmental Management [en línea]. pp. 1 – 8. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.06.024>. [Consulta: 15 de febrero 2020].
- Bivand, R.S. Pebesma, E.J. Gómez-Rubio, V. 2008. Applied Spatial Data Analysis with R [en línea]. Springer Science+Business Media, LLC, 233 Spring Street, New York, USA: Gentleman, R; Hornik, K; Parmigiani, G. Disponible en: <https://10.1007/978-0-387-78171-6>. [Consulta: 15 de septiembre 2017].
- Bogunovic I, Trevisani S, Seput M, Juzbasic D, y Durdevic B. 2017. Short-range and regional spatial variability of soil chemical properties in an agro-ecosystem in eastern Croatia [en línea]. Catena 154, pp. 50 – 62. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2017.02.018>. [Consulta: 21 de abril 2018].
- Bogunovic, I. Mesic, M. Zgorelec, Z. Jurisic, A. y Bilandzija, D. 2014. Spatial variation of soil nutrients on sandy-loam soil [en línea]. Soil & Tillage Research, 144, pp. 174 – 183. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2014.07.020>. [Consulta: 15 de septiembre 2020].
- Bogunovic, I. Trevisani, S. Pereira, P. Vukadinovic, V. 2018. Mapping soil organic matter in the Baranja region (Croatia): Geological and anthropic forcing parameters [en línea]. Science of the Total

- Environment. 643, pp. 335 – 345. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.193>. [Consulta: 15 de septiembre 2020]
- Brussaard Lijbert. 2012. Ecosystem Services Provided by the Soil Biota [en línea]. En: Soil Ecology and Ecosystem Services. First Edition. Diana H. Wall *et al.* (Eds.). Oxford University Press. Disponible en: [https://www.wageningenur.nl/upload\\_mm/e/1/a/a7ae541a-b634-45e4-ba1d-a3956cdae3f7\\_Wall%20book%20chapter%201.3%20Brussaard.pdf](https://www.wageningenur.nl/upload_mm/e/1/a/a7ae541a-b634-45e4-ba1d-a3956cdae3f7_Wall%20book%20chapter%201.3%20Brussaard.pdf). [Consulta: 15 de septiembre 2020].
  - Bruulsema, T. 2018. Managing nutrients to mitigate soil pollution [en prensa]. Environmental Pollution. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.09.132>. [Consulta: 15 de septiembre 2020].
  - Burbano, Hernán. 2016. El suelo y su relación con los servicios ecosistémicos y la seguridad alimentaria [en línea]. Ciencias Agrícolas, Vol. 33, No. 2, pp. 117 – 124. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.22267/rcia.163302.58>. [Consulta: 20 de septiembre 2019]
  - Burkhard, B. y Maes, J. 2017. Introduction [en línea]. En: Mapping Ecosystem Services. Burkhard B, Maes J. Sofia (Eds.). Bulgaria: Pensoft Publishers, Capítulo 1. [Consulta: 15 de septiembre 2019].
  - Cai, L. Wang, Q. Wen, H. Luo, J. Wang, S. 2019. Heavy metals in agricultural soils from a typical township in Guangdong Province, China: Occurrences and spatial distribution [en línea]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 168, pp. 184 – 191. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.10.092>. [Consulta: 15 de septiembre 2020].
  - Caride, C. Paruelo, J. y Piñeiro, G. 2010. Manejo agrícola y secuestro de carbono [en línea]. En: Valoración de Servicios ecosistémicos. Latera, P; Esteban, G; Paruelo, J. (Eds). Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Argentina. Capítulo 20. Disponible en:

<http://www.iai.int/files/LaterraJobbagyParueloValorEcosyst.pdf>.

[Consulta: 2 de octubre 2014].

- Castro, M. García, D. y Jiménez, A. 2017. Comparación de técnicas de interpolación espacial de propiedades del suelo en el piedemonte llanero colombiano [en línea]. *Revista Tecnura*, Vol. 21, No. 53, pp. 78 – 95. Disponible en: <https://doi.org/10.14483/22487638.11658>. [Consulta: 15 de septiembre 2020].
- Charlotte, E. Pereira, D. y Hirsch, A. 2014. Uso de Sistema de Informaciones Geográficas para espacialización de datos del área de producción agrícola [en línea]. En: *Manual de Agricultura de precisión*. Chartuni Mantovani, Evandro y Magdalena, Carlos. IICA, PROCISUR - Montevideo: IICA. Capítulos 1 y 2. [Consulta: 15 de septiembre 2020].
- Comerford, N. Franzluebbbers, A. Stromberger, M. Morris, L. Markewitz, D. Moore, R. 2013. Assessment and Evaluation of Soil Ecosystem Services [en línea]. *Soil Horizons*, pp. 1 – 14. Disponible en: <http://pubag.nal.usda.gov/pubag/downloadPDF.xhtml?id=57856&content=PDF>. [Consulta: 12 de noviembre 2015].
- Cord A, Schwarz N, Seppelt R, Volk M, Schröter M. 2019. Introduction to Part III: Trade-Offs and Synergies Among Ecosystem Services. En: Schröter *et al.* (eds) *Atlas of Ecosystem Services*. Gewerbestrasse 11, 6330 Cham, Switzerland: Springer International Publishing AG. pp. 245 – 248. Disponible en: <http://doi.org/10.1007/978-3-319-96229-0>. [Consulta: 12 de abril 2021].
- Costanza, R. d'Arge, R. De Groot, R. Farber, S. Grasso, M. Hannon, B. Limburg, K. Naeem, S. V. O'Neill, R. Paruelo, J. G. Raskin, R. Sutton, P. Van den Belt, M. 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital [en línea]. *Nature*. Vol 387. [Consulta: 15 de septiembre 2018].
- Cottenie, A. 1984. Los análisis de suelos y de plantas como base para formular recomendaciones sobre fertilizantes. *Boletín de suelos de la FAO*. 38/2. Roma. 116 p.
- Cuéllar, A.I. de León, M. Gómez, A. Piñón, D. Villegas, R. Santana, I. 2003. *Caña de azúcar: Paradigma de Sostenibilidad*. Instituto de



- Investigaciones de la Caña de Azúcar. Editorial Publicina. La Habana, Cuba.
- Daily, G. 1997. Nature's Services: Societal Dependence On Natural Ecosystems. Island Press, Washington, D.C. [Consulta: 15 de septiembre 2017].
  - De Groot, R. Alkemade, L. Braat, L. Hein, L. Willemen. 2010. Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making [en línea]. Ecological Complexity. pp. 260 – 272. Disponible en: <https://10.1016/j.ecocom.2009.10.006>. [Consulta: 15 de septiembre 2020].
  - De Groot, R. Wilson, M. Boumans, R. 2002. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. Special issue: The Dynamics and Value of Ecosystem Services: Integrating Economic and Ecological Perspectives [en línea]. Ecological Economics, 41, pp. 393 – 408. Disponible en: [www.elsevier.com/locate/ecolecon](http://www.elsevier.com/locate/ecolecon). [Consulta: 12 de noviembre 2015].
  - Dirección de Manejo Agronómico. *Normas metodológicas del Departamento de Suelos y Agroquímica*, 1980. Tomos I y II. Instituto de Investigaciones de la Caña de Azúcar. 150 p.
  - Dominati E. 2013. Natural capital and ecosystem services of soils. In Dymond JR ed. Ecosystem services in New Zealand – conditions and trends. Manaaki Whenua Press, Lincoln, New Zealand. Disponible en: [https://www.landcareresearch.co.nz/\\_data/assets/pdf\\_file/0008/77039/11\\_Dominati.pdf](https://www.landcareresearch.co.nz/_data/assets/pdf_file/0008/77039/11_Dominati.pdf). [Consulta: 15 de junio 2017].
  - Dominati E. Mackay A. y Patterson M. 2010. Modelling the provision of ecosystem services from soil natural capital. 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World 1 – 6 August 2010, Brisbane, Australia. Published on DVD. Disponible en: <http://iuss.org/19th%20WCSS/Symposium/pdf/1841.pdf>. [Consulta: 15 de junio 2017].
  - Dominati, E. Mackay, A. Green, S. Patterson, M. 2014. A soil change-based methodology for the quantification and valuation of ecosystem

- services from agro-ecosystems: A case study of pastoral agriculture in New Zealand [en línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2014.02.008>. [Consulta: 15 de septiembre 2020].
- Drobnik T., Greiner L., Keller A., Grêt A. 2018. Soil quality indicators – From soil functions to ecosystem services. *Ecological Indicators*, [en línea] 94 pp. 151 – 169. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.06.052>. [Consulta: 15 de mayo 2020].
  - Eastwood, A. Brooker, R. Irvine, R. Artz, R. Norton, L. Bullock, J. Ross, L. Fieldin, D. Ramsay, S. Roberts, J. Anderson, W. Dugan, D. Cooksley, S. Pakeman, R. 2016. Does nature conservation enhance ecosystem services delivery? [en línea]. *Ecosystem Services*, 17, pp. 152 – 162. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoser.2015.12.001>. [Consulta: 15 de septiembre 2020].
  - Edwin A. y Muthu. 2021. Soil Fertility, Integrated Management, and Sustainability [en línea]. En: *Life on Land. Encyclopedia of the UN Sustainable Development Goals*. Walter Leal Filho *et al.* (Eds.). Springer Nature Switzerland AG. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-95981-8>. [Consulta: 15 de septiembre 2021].
  - Emery, Xavier. 2013. *Geoestadística* [en línea]. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. [Consulta: 15 de septiembre 2020].
  - Erhard, M. Banko, G. Abdul, D. y Santos, F. 2017. Mapping ecosystem types and conditions [en línea]. En: *Mapping Ecosystem Services*. Burkhard B, Maes J. Sofia (Eds). Bulgaria: Pensoft Publishers, Capítulo 3. [Consulta: 15 de septiembre 2020].
  - FAO. 2016. *Agricultura mundial: hacia los años 2015/2030. Informe resumido...* Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/004/y3557s/y3557s11.htm#TopOfPage>. [Consulta: 30 de abril 2019].
  - Febrero, M. Galeano, P. González, J. Pateiro, B. 2008. *Prácticas de Estadística en R* [en línea]. Ingeniería Técnica en Informática de

- Sistemas. Departamento de Estadística e Investigación Operativa Universidad de Santiago de Compostela. ISBN-13: 978-84-691-0975-1. [Consulta: 15 de septiembre 2020].
- Fernández E. y Ribes M. 2014. Uso de la geoestadística y los sistemas de información geográfica en agricultura [en línea]. En: Manual de Agricultura de precisión. Chartuni Mantovani, Evandro y Magdalena, Carlos. IICA, PROCISUR - Montevideo: IICA, capítulo 2. Disponible en: <http://www.gisandbeers.com/RRSS/Publicaciones/Manual-Agricultura-Precision.pdf>. [Consulta:15 de septiembre 2020]
  - Ferraro, D. Piñeiro, G. Laterra, P. Nogués, A. De Prada, J. 2010. Aproximaciones y herramientas para la Evaluación de servicios ecosistémicos [en línea]. En: Valoración de Servicios ecosistémicos. Latera, P; Esteban, G; Paruelo, J. (Eds). Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Argentina. Capítulo 30 pp. 673 – 687. ISBN 978-978-679-018-5. Disponible en: <http://www.iai.int/files/LaterraJobbagyParueloValorEcosyst.pdf>. [Consulta: 15 de septiembre 2021].
  - Fu, W. Tunney, H. Zhang, Ch. 2010. Spatial variation of soil nutrients in a dairy farm and its implications for site-specific fertilizer application [en línea]. Soil & Tillage Research, 106, pp. 185 – 193. Disponible en: <https://10.1016/j.still.2009.12.001>. [Consulta: 15 de septiembre 2018].
  - Fulford R, Yoskowitz D, Russell M, Dantin D, Rogers J. 2016. Habitat and recreational fishing opportunity in Tampa Bay: Linking ecological and ecosystem services to human beneficiaries. Ecosystem Services [en línea] 17, pp. 64 – 74. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoser.2015.11.009>. [Consulta: 29 de diciembre 2016].
  - Gaba, S. Lescourret, F. Boudsocq, S. Enjalbert, J. Hinsinger, P. Journet, E. Navas, M. Wery, J. Louarn, G. Malézieux, E. Pelzer, E. Prudent, M. Ozier, Lafontaine H. 2015. Multiple cropping systems as drivers for providing multiple ecosystem services: from concepts to design [en línea]. Agron. Sustain. Dev. 35, pp. 607 – 623. Springer.

- Disponible en: <https://10.1007/s13593-014-0272-z>. [Consulta: 15 de septiembre 2018].
- Gallardo, A. 2006. Geostadística [en línea]. Ecosistemas Vol. 15, No. 3, pp. 48 – 58. Disponible en <http://www.google.com.cu/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=7&cad=rja&uact=8&sqi=2&ved=0CDAQFjAGahUKEwj89I7y1lrIAhUJWx4KHTwEAMA&url=http%3A%2F%2Fwww.revistaecosistemas.net%2Findex.php%2Fecosistemas%2Farticle%2Fdownload%2F161%2F158&usq=A FQjCNEKYP8f - THdP7ngMzjtY7Ou6W07w&bvm=bv.103073922,d.dmo>. [Consulta: 15 de septiembre 2020].
  - García Y., Orozco M. 2021. Análisis geoestadístico como base para contribuir al manejo sostenible del agrosistema azucarero. Ingeniería Industrial, [en línea]. ISSN 1815-5936. XLII (2), pp. 1 – 14. Disponible en: <http://www.rii.cujae.edu.cu>. [Consulta: 20 de junio 2021].
  - García, P. J. Lucena, J. J. Ruano, S. C. Nogales, M. G. 2009. Guía práctica de la fertilización racional de los cultivos en España [en línea]. España: Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Disponible en: <http://www.magrama.gob.es/es/agricultura/publicaciones/01FERTILYACI%C3%96N%28BAJA%29tcm7-207769.pdf>. [Consulta: 5 de noviembre 2015].
  - Ge S., Zhu Z., Jiang Y. 2018. Long-term impact of fertilization on soil pH and fertility in an apple production system. J Soil Sci Plant Nutr [en línea] 18 (1) pp. 282 – 293. ISSN 0718-9516. Disponible en: <https://doi.org/10.4067/s0718-95162018005001002>. [Consulta: 29 de diciembre 2019].
  - González-Corzo. 2015. La agroindustria cañera cubana: transformaciones recientes [en línea]. Bildner Center for Western Hemisphere Studies. The Graduate Center. The City University of New York 365 Fifth Avenue, Suite 3300.23. Disponible en: [http://www.gc.cuny.edu/CUNY\\_GC/media/365-Images/SugarEbook.pdf](http://www.gc.cuny.edu/CUNY_GC/media/365-Images/SugarEbook.pdf). [Consulta: 8 de diciembre 2016].

- González, C. E. Gavito, M. E. Astier, M. Cadena-Salgado, M. del-Val, E. Villamil-Echeverri, L. Merlín-Uribe, Y. Balvanera. P. 2015. Ecosystem service trade-offs, perceived drivers, and sustainability in contrasting agroecosystems in central Mexico [en línea]. *Ecology and Society*, Vol. 20, No. 1, pp. 38. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.5751/ES-06875-200138>. [Consulta: 15 de septiembre 2020].
- Grunewald, K. Bastian, O. Syrbe, R.-U. 2015. Space and Time Aspects of ES [en línea]. En: *Ecosystem Services – Concept, Methods and Case Studies*. Grunewald, K. y Bastian, O. (Eds.). Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, pp. 53 – 65. Disponible en: <https://10.1007/978-3-662-44143-5>. [Consulta: 15 de septiembre 2020].
- Guan, F. Xia, M. Tang, X. y Fan, S. 2017. Spatial variability of soil nitrogen, phosphorus and potassium contents in Moso bamboo forests in Yong'an City, China [en línea]. *Catena*, 150, pp. 161 – 172. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2016.11.017>. [Consulta: 15 de septiembre 2020].
- Henríquez, C. Killorn, R. Bertsch, F. y Sancho, F. 2005. La geostatística en el estudio de la variación espacial de la fertilidad del suelo mediante el uso del interpolador kriging [en línea]. *Agronomía Costarricense*, Vol. 29, No. 2, pp. 73 – 81. Disponible en: [http://www.mag.go.cr/rev\\_agr/v29n02\\_073.pdf](http://www.mag.go.cr/rev_agr/v29n02_073.pdf). [Consulta: 28 de julio 2015].
- Hou, D. O'Connor, D. Nathanail, P. Tian, L. Ma, Y. 2017. Integrated GIS and multivariate statistical analysis for regional scale assessment of heavy metal soil contamination: A critical review [en prensa]. *Environmental Pollution*. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2017.07.021>. [Consulta: 15 de septiembre 2020].
- IPNI. 2013. Manual de nutrición de plantas 4R: Un manual para mejorar el manejo de la nutrición de las plantas. Editores: Bruulsema, T.W.; Fixen, P.E.; Sulewski, G.D. International Plant Nutrition Institute, Norcross, GA, EE.UU.

- Jónsson JÖG, Davíðsdóttir B, Nikolaidis NP, Giannakis GV. 2019. Tools for Sustainable Soil Management: Soil Ecosystem Services, EROI and Economic Analysis. *Ecological Economics* [en línea] 157, pp. 109 – 119. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.11.010>. [Consulta: 15 de marzo 2020].
- Keith, A. Schmidt, O. McMahon, B. 2016. Soil stewardship as a nexus between Ecosystem Services and One Health [en línea]. *Ecosystem Services*, 17, pp. 40 – 42. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoser.2015.11.008>. [Consulta: 15 de septiembre 2020].
- Khan M Saiful I. 2021. Supporting Ecosystem Services: Concepts and Linkages to Sustainability [en línea]. En: *Life on Land. Encyclopedia of the UN Sustainable Development Goals*. Walter Leal Filho *et al.* (Eds.). Springer Nature Switzerland AG. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-95981-8>. [Consulta: 15 de septiembre 2021].
- Khan, A. Lu, G. Ayaz, M. Zhang, H. Wang, R. Lv, F, Zhang, S. 2018. Phosphorus efficiency, soil phosphorus dynamics and critical phosphorus level under long-term fertilization for single and double cropping systems [en línea]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 256, pp. 1 – 11. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.01.006>. [Consulta: 15 de septiembre 2020].
- Kibet L, Blanco H. y Jasab P. 2016. Long-term tillage impacts on soil organic matter components and related properties on a Typic Argiudoll. *Soil & Tillage Research* [en línea] 155, pp. 78 – 84. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2015.05.006>. [Consulta: 10 de junio 2019].
- Kingston G. 2014. Mineral nutrition of sugarcane [en línea]. En: *Sugarcane: Physiology, Biochemistry, and Functional Biology*. Moore P. H., Botha F. C. (Eds.). Oxford: John Wiley & Sons, pp. 85 – 120. [Consulta: 15 de septiembre 2020].
- Kumar, N. Sinha, N.K. 2018. Geostatistics: Principles and Applications in Spatial Mapping of Soil Properties [en línea]. En: *Geospatial Technologies in Land Resources Mapping, Monitoring and Management*,

- Geotechnologies and the Environment. Reddy, G. P. O.; Singh S. K., (Eds.). 21. Springer International Publishing AG, part of Springer Nature. Capítulo 8. Disponible en: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-78711-4\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-319-78711-4_8). [Consulta: 15 de septiembre 2020].
- La Nottea, A. Maesa, J. Dalmazzoneb, S. Crossmanc, N. Grizzettia, B. Bidoglioa G. 2016. Physical and monetary ecosystem service accounts for Europe: A case studyfor in-stream nitrogen retention [en línea]. Ecosystem Services, 23 pp. 18 – 29. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoser.2016.11.002>. [Consulta: 29 de diciembre 2016]
  - LaDeau, S. Han, B. Rosi-Marshall, E. Weathers, K. 2017. The Next Decade of Big Data in Ecosystem Science [en línea]. Ecosystems, 20, pp. 274 – 283. Disponible en: <https://10.1007/s10021-016-0075-y>. [Consulta: 15 de septiembre 2018].
  - LATERRA, P. Castellarini, F. Orúe, E. 2010. ECOSER: Un protocolo para la evaluación biofísica de servicios ecosistémicos y la integración con su valor social [en línea]. En: Valoración de Servicios ecosistémicos. Latera, P; Esteban, G; Paruelo, J. (Eds). Argentina: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Capítulo 16. Disponible en: <http://www.iai.int/files/LATERRAJobbagoParueloValorEcosyst.pdf>. [Consulta: 2 de octubre 2014].
  - Logsdon, D. Cole, J. 2018. Soil nutrient variability and groundwater nitrate-N in agricultural fields [en línea]. Science of the Total Environment. 627, pp. 39 – 45. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.182>. [Consulta: 15 de septiembre 2020].
  - Meena H, Sharma R, Sankhyan N, Sepehya S. 2017. Effect of continuous application of fertilizers, farm yard manure and lime on soil fertility and productivity of maize-wheat system in an acid Alfisol. Commun Soil Sci Plant Anal [en línea] 48. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/00103624.2017.1373800>. [Consulta: 29 de diciembre 2019].

- Melchiori, R. Kemerer, A. y Albarenque, S. 2014. Monitores de rendimiento y mapeo [en línea]. En: Manual de Agricultura de precisión. Chartuni Mantovani, Evandro y Magdalena, Carlos. IICA, PROCISUR - Montevideo: IICA. Capítulos 1 y 2. [Consulta: 15 de septiembre 2017].
- Millenium Ecosystem Assessment. 2005. Ecosystems and human well-being: synthesis. Island Press, Washington D.C: Island Press. 155 pp. [Consulta: 15 de septiembre 2017].
- Millennium Ecosystem Assessment. 2003. Ecosystems and Human Well-being: A Framework for Assessment. Island Press. 1718 Connecticut Avenue, N.W., Suite 300, Washington, DC 20009. [Consulta: 15 de septiembre 2017].
- Moebius, B. Moebius, B. Gugino, O. Idowu, R. Schindelbeck, A. Ristow, H. Van Es, J. Thies, H. Shayler, M. McBride, D. Wolfe y Abawi, G. 2016. Comprehensive Assessment of Soil Health – The Cornell Framework Manual [en línea], Edition 3.1, Cornell University, Geneva, NY. Disponible en: <http://soilhealth.cals.cornell.edu>. [Consulta: 15 de septiembre 2020].
- Mokondoko, P. Manson, R. Ricketts, T. Geissert, D. 2018. Spatial analysis of ecosystem service relationships to improve targeting of payments for hydrological services [en línea]. PLoS ONE, Vol. 13 No. 2. Dsponible en: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0192560>. [Consulta: 15 de septiembre 2020].
- Nicolas, H. 2004. Métodos estadísticos en problemas espaciales. Tesis presentada en parcial cumplimiento para la obtención del grado de Magister en Estadística Aplicada. Instituto de Investigaciones Estadísticas, Facultad de Ciencias Económicas, Universidad Nacional de Tucumán, San Miguel de Tucumán. [Consulta: 15 de septiembre 2017].
- Oliver, A. y Webster, R. 2015. Basic Steps in Geostatistics: The Variogram and Kriging [en línea]. Springer Briefs in Agriculture. Springer Cham Heidelberg New York. Disponible en: [https://10.1007/978-3-319-15865-5\\_1](https://10.1007/978-3-319-15865-5_1). [Consulta: 15 de septiembre 2019].



- Paterson, S. Minasny, B. y McBratney, A. 2018. Spatial variability of Australian soil texture: A multiscale analysis [en línea]. *Geoderma*, 309, pp. 60 – 74. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.09.005>. [Consulta: 15 de septiembre 2020].
- Pérez, H. Santana, I. Rodríguez, I. 2015. Manejo Sostenible de Tierras en la Producción de Caña de Azúcar [en línea]. Ediciones UTMACH. Universidad Técnica de Machala. Km. 5 1/2 Vía Machala Pasaje. Ecuador. Disponible en: <http://repositorio.utmachala.edu.ec/bitstream/48000/6649/1/16%20MANEJO%20SOSTENIBLE%20DE%20LA%20TIERRA%20EN%20LA%20PRODUCCION%20DE%20CA%20C3%91A%20DE%20AZUCAR%20VOL%20II.pdf>. [Consulta: 16 de enero 2020].
- Perlatti, P. Forim, M. Zuin, V. 2014. Green chemistry, sustainable agriculture and processing systems: a Brazilian overview [en línea]. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 1:5. Disponible en: <http://www.chembioagro.com/content/1/1/5>. [Consulta: 15 de septiembre 2018].
- Piotrowska-Długosza, A. Breza-Borutab, B. y Długosza, J. 2019. Spatial and temporal variability of the soil microbiological properties in two soils with a different pedogenesis cropped to winter rape (*Brassica napus* L.) [en línea]. *Geoderma*, 340, pp. 313 – 324. Disponible en: <http://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.01.020>. [Consulta: 15 de septiembre 2020].
- R Core Team. 2019. R: A language and environment for statistical computing [en línea]. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Disponible en: <https://www.R-project.org/>. [Consulta: 15 de septiembre 2020].
- Ramesh S, Kaplana K. 2015. Ecological integrity and environmental protection for Vijayawada region – Scattered Eastern Ghats. *International Journal of Sustainable Built Environment* [en línea] 4, pp. 109 – 116. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2015.03.003>. [Consulta: 29 de diciembre 2016].

- Rehman, A., Ullah, A., Nadeem, F., Farooq, M. 2019. Sustainable nutrient management [en línea]. En: Innovations in sustainable agriculture. Farooq M, Pisante M (Eds) Springer Nature, Basel. Disponible en: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-23169-9\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-030-23169-9_7). [Consulta: 15 de septiembre 2020].
- Resende, Á.V. y Coelho A.M. 2014. Muestreo para mapeo y manejo de la fertilidad del suelo [en línea]. En: Manual de Agricultura de precisión. Chartuni Mantovani, Evandro y Magdalena, Carlos. IICA, PROCISUR - Montevideo: IICA, capítulo 1. Disponible en: <http://www.ica.int>. [Consulta: 15 de septiembre 2017].
- Riechers M., Barkmann J., Tschardt T., 2016. Perceptions of cultural ecosystem services from urban green. Ecosystem Services 17 p. 33–39. ScienceDirect. ISSN: 2212-0416. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoser.2015.11.007>. [Consulta: 15 de septiembre 2020].
- Rincón, A. Echeverry, M. Piñeros, A. Tapia, C. David, A. Zuluaga, P. 2014. Valoración integral de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos: Aspectos conceptuales y metodológicos [en línea]. Bogotá, D. C. Colombia. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH). 151 p. Disponible en: [http://www.iai.int/admin/site/sites/default/files/uploads/2015/08/VIBSE\\_2014\\_1.pdf](http://www.iai.int/admin/site/sites/default/files/uploads/2015/08/VIBSE_2014_1.pdf). [Consulta: 4 de diciembre 2019].
- Ronchi, S. 2018. Ecosystem Services for Spatial Planning, Green Energy and Technology [en línea]. Gewerbestrasse 11, 6330 Cham, Switzerland: Springer International Publishing AG. Disponible en: [http://org/10.1007/978-3-319-90185-5\\_2](http://org/10.1007/978-3-319-90185-5_2). [Consulta: 15 de septiembre 2020].
- Rosemary, F. Vitharana, U. Indraratne, S. Weerasooriya, R. Mishra, U. 2017. Exploring the spatial variability of soil properties in an Alfisol soil catena [en línea]. Catena. 150, pp. 53 – 61. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2016.10.017>. [Consulta: 15 de septiembre 2020].

- Sánchez, P. 1981. Suelos del trópico: Características y manejo. Traducción Edilberto Camacho. IICA. San José, Costa Rica.
- Sankar, G. Kumar, P. y Chattopadhyay, R. 2018. Assessment of spatial variability of soil properties using geostatistical approach of lateritic soil (West Bengal, India) [en línea]. *Annals of Agrarian Science*, 16, pp. 436 – 443. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.aasci.2018.06.003>. [Consulta: 15 de septiembre 2020].
- Schröter, M. Ring, I. Schröter, Ch. y Bonn, A. 2019. The Ecosystem Service Concept: Linking Ecosystems and Human Wellbeing [en línea]. En: *Atlas of Ecosystem Services Drivers, Risks, and Societal Responses*. Schröter Matthias, Bonn Aletta, Klotz Stefan, Seppelt Ralf, Baessler Cornelia (Eds). Springer International Publishing AG, part of Springer Nature. Capítulo 2. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-96229-0>. [Consulta: 14 de mayo 2019].
- Senamhi (Servicio nacional de meteorología e hidrología del Perú). 2014. Análisis comparativo de métodos de interpolación espacial para la elaboración de mapas climáticos de precipitación. Lima – Perú. [Consulta: 15 de septiembre 2017].
- SERFE (Manual Servicio de Fertilización de la Caña de Azúcar). 2014. Instituto de Investigaciones de la Caña de Azúcar. Carretera al Central “Martínez Prieto” Km 2½, General Peraza CP19390. La Habana, Cuba.
- Soy-Massoni, E., Langemeyer, J., Varga, D., Sáez, M., Pintó, J. 2016. The importance of ecosystem services in coastal agricultural landscapes: Case study from the Costa Brava, Catalonia. *Ecosystem Services* [en línea] 17 pp. 43 – 52. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoser.2015.11.004>. [Consulta: 13 de septiembre 2017].
- Su, Ch. Liu, H. Wang, Sh. 2018. A process-based framework for soil ecosystem services study and management [en línea]. *Science of the Total Environment*. 627, pp. 282 – 289. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.244>. [Consulta: 15 de septiembre 2020].

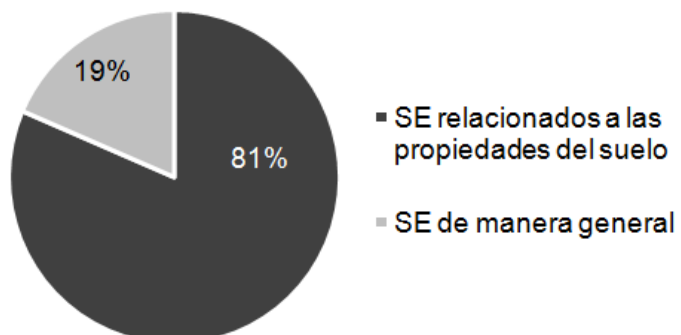
- TEEB. 2008. La economía de los ecosistemas y la biodiversidad. Informe provisional: TEEB, 70 p. [Consulta: 21 de septiembre 2017].
- TEEB. 2010. The Ecological and Economic Foundations, European Commission, Earthscan, Londres. [Consulta: 21 de septiembre 2017].
- Thompson, Ole. 2021. Agrarianism: The Way to Sustainability and Resilience [en línea]. En: Life on Land. Encyclopedia of the UN Sustainable Development Goals. Walter Leal Filho *et al.* (Eds.). Springer Nature Switzerland AG. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-95981-8>. [Consulta: 15 de septiembre 2021].
- Tola, E. Al-Gaadi, K. Madugundu, R. Zeyada, A. Kayad, A. Biradar, C. 2017. Characterization of spatial variability of soil physicochemical properties and its impact on Rhodes grass productivity [en línea]. Saudi Journal of Biological Sciences, 24, pp. 421 – 429. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.sjbs.2016.04.013>. [Consulta: 15 de septiembre 2018].
- Vanacht, M. 2014. Aspectos económicos: análisis de viabilidad de adopción de intervenciones en los sistemas de producción [en línea]. En: Manual de Agricultura de precisión. Chartuni Mantovani, Evandro y Magdalena, Carlos. IICA, PROCISUR - Montevideo: IICA, capítulo 2. [Consulta: 15 de septiembre 2017].
- Vang, L., Mertz, O., Christensen, A., Danielsen, F., Dawson, N., Xaydongvanh, P. 2016. A combination of methods needed to assess the actual use of provisioning ecosystem services. Ecosystem Services [en línea] 17 pp. 75 – 86. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoser.2015.11.005>. [Consulta: 25 de mayo 2018].
- Vasu, D. Singh, S. Sahu, N. Tiwary, P. Chandran, P. Duraisami, V. Ramamurthy, V. Lalitha, M. Kalaiselvi, B. 2017. Assessment of spatial variability of soil properties using geospatial techniques for farm level nutrient management [en línea]. Soil & Tillage Research. 169, pp. 25 – 34. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2017.01.006>. [Consulta: 15 de septiembre 2020].

- Verhulst, N., François, I. y Govaerts, B. 2015. Agricultura de conservación y captura de carbono en el suelo: Entre el mito y la realidad del agricultor. [Consulta: 10 de febrero 2019].
- Veronesi, F. Corstanje, R. Mayr, T. 2014. Landscape scale estimation of soil carbon stock using 3D modelling [en línea]. *Sci. Total Environ*, 487, pp. 578 – 586. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2016.11.017>. [Consulta: 15 de septiembre 2017].
- Viglizzo, E. Carreño, L. Volante, J. Mosciaro, M. 2010. Valuación de bienes y servicios ecosistémicos [en línea]. En: *Valoración de Servicios ecosistémicos*. Latera, P; Esteban, G; Paruelo, J. (Eds). Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Argentina ISBN 978-978-679-018-5. Disponible en: <http://www.iai.int/files/LaterraJobbagyParueloValorEcosyst.pdf>. [Consulta: 18 de septiembre 2016].
- Vihervaara, P. Mononen, L. Santos, F. Adamescu, M. Cazacu, C. Luque, S. Geneletti, D. y Maes, J. 2017. Biophysical quantification. En: *Mapping Ecosystem Services*. Burkhard B, Maes J. Sofia. Bulgaria: Pensoft Publishers, Capítulo 4. [Consulta: 15 de septiembre 2020].
- Vogel, H. Wollschläger, U. Helming, K. Heinrich, U. Willms, M. Wiesmeier, M. Russell, D. y Franko, U. 2019. Assessment of Soil Functions Affected by Soil Management [en línea]. En: *Atlas of Ecosystem Services Drivers, Risks, and Societal Responses*. Schröter Matthias, Bonn Aletta, Klotz Stefan, Seppelt Ralf, Baessler Cornelia (Eds). Springer International Publishing AG, part of Springer Nature. Capítulo 13. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-96229-0>. [Consulta: 14 de mayo 2019].
- Waweru, P. Burkhard, B. Muller, F. 2016. A review of studies on ecosystem services in Africa [en línea]. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 5, pp. 225 – 245. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijsbe.2016.08.005>. [Consulta: 29 de diciembre 2016].

- Willemen, L. Jones, S. Estrada, N. y DeClerck, F. 2017. Ecosystem service maps in agricultura [en línea]. En: *Mapping Ecosystem Services*. Burkhard B, Maes J. Sofia. Bulgaria: Pensoft Publishers, Capítulo 7. [Consulta: 15 de septiembre 2020].
- Xiangzheng D, Zihui L, Gibson J. 2016. A review on trade-off analysis of ecosystem services for sustainable land-use management. *J. Geogr. Sci.* [en línea], 26 (7), pp. 953 - 968. Disponible en: <http://10.1007/s11442-016-1309-9>. [Consulta: 10 de junio 2020].

## 8. Anexos

**Anexo 1.** Perfil de investigación de 54 trabajos científicos realizados en la temática de servicios ecosistémicos en el período de 2017 a 2019 (información sacada de la *Web Science*).



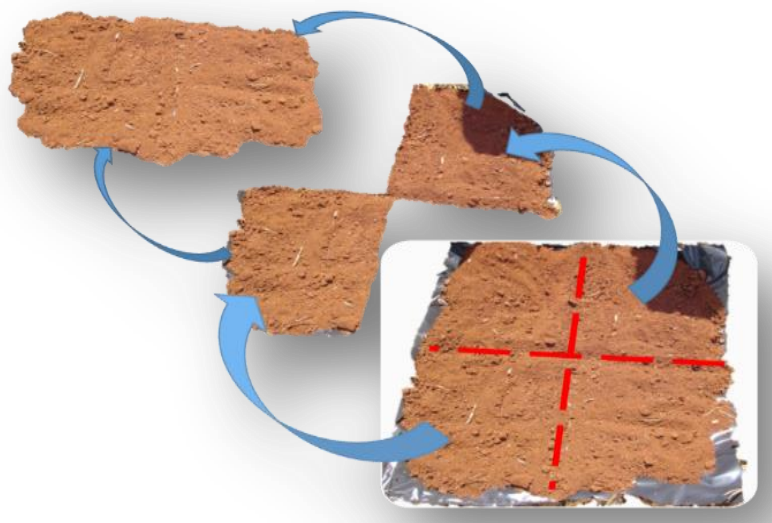
**Anexo 2.** Esquema representativo de la georreferenciación y colecta de las muestras de suelo



- Línea de división intra-campo
- · - · Diagonal para el muestreo de suelo
- Punto de georreferenciación en el campo de caña de azúcar



**Anexo 3.** Esquema representativo del método del cuarteo para la confección de la muestra de suelo compuesta.



**Anexo 4.** *Parámetros del semivariograma experimental ajustado* (Oliver y Webster, 2015).

