



Procedimiento para valorar la variabilidad espacio-temporal en un proceso ecosistémico de soporte

Procedure to assess spatio-temporal variability in a supporting ecosystem process

Yasmany García-López^{1,*} <http://orcid.org/0000-0002-5629-4074>

Juan Alfredo Cabrera-Hernández² <https://orcid.org/0000-0002-2723-3619>

¹Estación Provincial de Investigaciones de la Caña de Azúcar Antonio Mesa Hernández. Matanzas, Cuba.

² Universidad de Matanzas. Matanzas, Cuba

*Autor para la correspondencia: yasmanygarcia31@gmail.com

RESUMEN

El enfoque ecosistémico conlleva el entendimiento de las relaciones entre estructuras, procesos y servicios ecosistémicos. Por lo anterior, en el artículo se diseña y aplica un procedimiento para valorar la variabilidad espacio-temporal, que puede estar presente, en un proceso de soporte a los servicios ecosistémicos. Se utilizan los sitios específicos del fósforo asimilable en un suelo bajo el cultivo de la caña de azúcar, para cuantificar un costo por exceso de fertilizante fosfórico. Se proveen las diferencias, en valores económicos, entre categorías de este elemento en el suelo. Esto, enfatiza en el manejo y adaptación a la variabilidad espacio-temporal del proceso de disponibilidad de nutriente, para la sostenibilidad de la agroindustria azucarera.

Palabras clave: variabilidad espacio-temporal, proceso de soporte, enfoque ecosistémico.

ABSTRACT

Ecosystem approach involves the understanding of the relationships among structures, processes and ecosystem services. Therefore, the article designs and applies a procedure to assess spatial-temporal variability, which may be present, in a support process to ecosystem services. Specific sites of assimilable phosphorus are used in a soil under sugarcane cultivation, to quantify a cost for excess phosphoric fertilizer. Differences in economic values between categories of this element in the soil are provided. This emphasizes the management and adaptation to the spatial-temporal variability of the nutrient availability process, for the sustainability of the sugar agribusiness.

Keywords: *spatial-temporal variability, supporting process, ecosystem approach.*

Recibido: 16/11/2021

Aprobado: 16/06/2023

Introducción

El enfoque ecosistémico o de servicios ecosistémicos (SE) ha sido desarrollado en la literatura por diferentes autores [1; 2]. En Costanza *et al.*, (1997) se exponen a los servicios ecosistémicos, como flujos de materiales, energía e información del capital natural, los cuales combinados con la manufactura y servicios del capital humano producen bienestar a la sociedad [2]. En el enfoque de servicios ecosistémicos se han tratado aspectos ecológicos y económicos, relaciones entre ecosistemas y bienestar humano, así como la apropiación de recursos naturales y manejos que inciden sobre los procesos ecosistémicos para incrementar los bienes con valor de mercado [3; 4].

Según Dominati *et al.*, (2014), en el enfoque ecosistémico se definen los servicios de: provisión, regulación y cultural; así como los procesos que son soporte de los beneficios proporcionados por los ecosistemas [4]. Ambos, (procesos y servicios ecosistémicos) pueden ser predichos, analizados y diferenciados en términos espacio-temporales para prever beneficios y perjuicios [5]. Sin embargo, identificar correctamente los conflictos y potencialidades, estimar impactos simultáneos por favorecer un servicio y generar impactos en otros aspectos relacionados, no es una tarea simple [6].

Los métodos de valoración han sido una aproximación a la visión integrada del valor de los servicios ecosistémicos, con el uso de diferentes metodologías de tipo monetario, biofísico y sociocultural; que a su vez reportan diferentes resultados, según el tipo utilizado [7]. Considerar el uso de los servicios ecosistémicos en la toma de decisiones requiere de metodologías robustas que contribuyan al mapeo de su presencia [8] y analicen colecciones de datos, para incluir aspectos ambientales dentro del planeamiento económico local [9; 10]. Se necesitan robustez y flexibilidad para abordar la variabilidad espacio-temporal, típica de problemas ecológicos [11]. Un aspecto consecuente con el desarrollo tecnológico y las escalas de manejos, donde las actividades industrializadas, en las cuales las extensiones de tierras son trabajadas como unidades homogéneas, pasan por alto los fenómenos de variabilidades espacio-temporales. La falta de entendimiento de la dimensión espacio-temporal para los procesos y servicios ecosistémicos, dificulta su consideración adecuada dentro de la toma de decisiones [12]. Por tal motivo, el trabajo se centró en el diseño y aplicación de un procedimiento para valorar la variabilidad espacio-temporal, que puede estar presente, en un proceso que es soporte de los servicios ecosistémicos. Para ello, se utiliza como caso de estudio a la agroindustria azucarera y su manejo de nutrientes del suelo.

PROCEDIMIENTO PARA VALORAR LA VARIABILIDAD ESPACIO-TEMPORAL EN UN PROCESO ECOSISTÉMICO DE SOPORTE

Métodos

Se propone un procedimiento (figura 1) que profundiza en la cuantificación de variabilidades espacio-temporales inherente a las propiedades de los procesos que son soporte de los servicios ecosistémicos. Las variabilidades individuales de los indicadores asociados a procesos y servicios ecosistémicos, son relevantes para determinar el efecto de las intervenciones, evaluar políticas y estimar escenarios futuros [12].

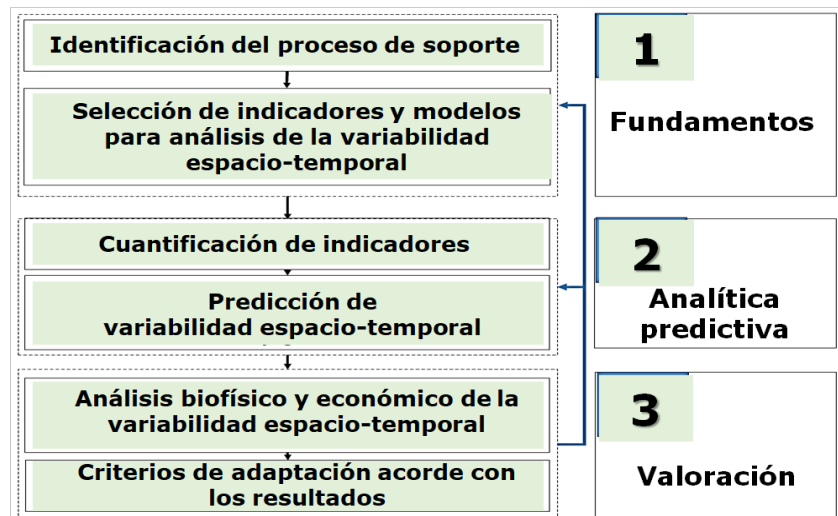


Fig. 1 - Propuesta de procedimiento.

Este procedimiento se compone de tres etapas básicas (Fundamentos, Analítica predictiva y Valoración), las cuales permiten llegar a conocimientos que mejoran los diagnósticos y la toma de decisiones que inciden en los servicios ecosistémicos. En la aplicación del procedimiento, se trabajó como caso de estudio la agroindustria azucarera localizada entre las coordenadas 22° 25' 42" N a 22° 29' 39" N y 80° 57' 22" O a 80° 52' 43" O, en el municipio Calimete, provincia Matanzas. Donde existen estudios e informaciones sobre variabilidad espacial de propiedades del suelo.

2.1 Etapa de Fundamentos

2.1.1 Identificación del proceso de soporte

En esta etapa se realizó un análisis bibliográfico sobre los servicios ecosistémicos (SE) y sus clasificaciones. Según Potschin y Haines-Young, (2017) el mayor acuerdo sobre los SE radica en la existencia de una senda, desde las estructuras y procesos ecosistémicos (considerados como procesos de soporte), hasta el bienestar humano [13]. En el caso agroindustrial azucarero, a las estructuras, procesos y funciones del ecosistema, se le adiciona la infraestructura antrópica y los manejos para potenciar un servicio de interés (figura 2), como puede ser la producción de azúcar. Sin embargo, la capacidad de generar otros servicios ecosistémicos en la región se ve fuertemente modificada por la inserción de las actividades agroindustriales en el ecosistema.

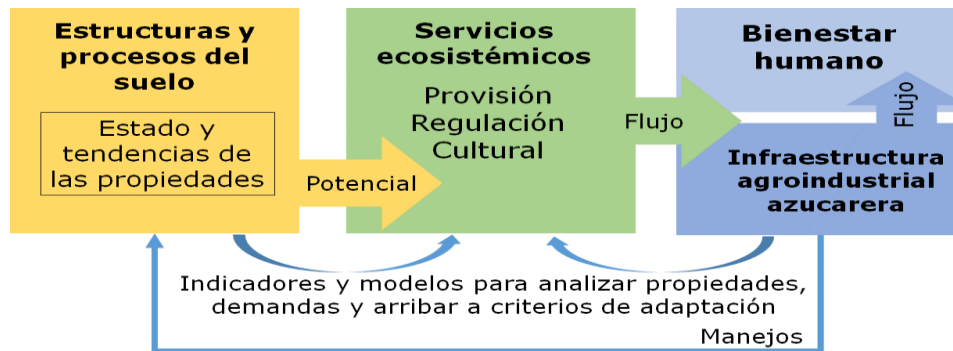


Fig. 2 - Marco conceptual de la valoración de servicios ecosistémicos

en un contexto agroindustrial azucarero. La provisión agroindustrial es dependiente del estado del suelo y su capacidad de proveer los nutrientes que son requeridos por la caña de azúcar. Por ello, debe ser adaptado el manejo de fertilizantes a la variabilidad espacio-temporal de este recurso y evitar problemas en su fertilidad. Lo que puede ser valorado mediante modelos y predicciones espacio-temporales de las propiedades del suelo en un campo agrícola y la determinación de costos por excesos o déficit en la fertilización.

2.1.2 Selección de indicadores y modelos para análisis de la variabilidad espacio-temporal

En el análisis crítico de los documentos consultados, se pudo captar la complejidad de las relaciones entre estructuras, procesos, funciones, servicios ecosistémicos con la infraestructura agroindustrial y el seguimiento del estado y tendencia al cambio de sus propiedades. Para ello, se deben abordar indicadores que pueden influir en las decisiones de manejo y las políticas a todos los niveles de la toma de decisiones [14]. 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 [15; 16]. En la práctica, las salidas agrícolas como rendimientos a diferentes escalas espacio-temporales, las determinaciones de los nutrientes asimilables o la materia orgánica del suelo, son indicadores para las evaluaciones en el enfoque de los servicios ecosistémicos [17]. Para este caso, se utiliza el fósforo asimilable del suelo, pues como será explicado en la etapa de: Analítica predictiva, existen informaciones precedentes, básicas para los análisis expuestos en este trabajo.

La selección de modelos, por su parte, deberá estar condicionadas a los análisis espaciales o de tiempo que se realicen y ser los que mejor se ajusten a los datos que se tienen, según criterios estadísticos y geo-estadísticos. Los diversos análisis estadísticos permiten un uso grande de colecciones de datos y ayudan a la aplicación de modelos para estudios en el enfoque de los servicios ecosistémicos a través de escalas, análisis y estimación de flujos de materiales y energía [18].

2.2 Etapa de Analítica predictiva

2.2.1 Cuantificación de indicadores

Mediante métodos directos (observaciones de campo, análisis de laboratorios), la georreferenciación y cartografía se realiza la cuantificación, lo que conlleva a las estrategias de colecta de información específica para cada propiedad de proceso de soporte seleccionado; así como la escala de trabajo. Del rigor con que se realice esta

PROCEDIMIENTO PARA VALORAR LA VARIABILIDAD ESPACIO-TEMPORAL EN UN PROCESO ECOSISTÉMICO DE SOPORTE

etapa dependerá el análisis de los estados y predicciones de tendencias al cambio en los procesos de soporte de los servicios ecosistémicos.

2.2.2 Predicción de variabilidad espacio-temporal

En Reddy y Singh, (2018) se recogen las etapas para predicciones espaciales [19], así como en James *et al.*, (2021) para la selección de diferentes modelos y algoritmos de aprendizaje [20]. Aunque cada modelo tiene sus especificidades para su aceptación, cabe destacar las principales etapas en el ajuste de los mismos.

- Análisis exploratorios, para examinar la distribución de los datos y realizar una caracterización de los mismos.
- División de los datos en entrenamiento y prueba, para identificar problemas de sobreajuste y realizar comprobaciones al modelo.
- Análisis estructural para datos espaciales; la principal herramienta es el semivariograma y permite identificar la máxima distancia a la cual dos muestras están correlacionadas.
- Análisis de residuos para detectar violaciones en restricciones del modelo.
- Validación cruzada, para determinar la relación entre las observaciones y los datos predichos por el modelo.

El ajuste de modelos no es una tarea sencilla, conlleva el cumplimiento de restricciones para considerar un resultado válido. No debe ser considerado un simple paso más con la ayuda de software estadísticos que facilitan el trabajo. Es una etapa de sumo cuidado, de experiencia del investigador, de intercambio, ajuste y comprobación. Necesita de sentido biológico de la predicción, es decir, que los resultados deben ser compatibles con las realidades físicas de las investigaciones, para llegar a valoraciones certeras de los procesos de soporte y los servicios ecosistémicos.

Para el análisis en este trabajo, se utilizó los resultados de García-López y Orozco-Bravo, (2021), donde es abordado el comportamiento del fósforo asimilable en campos de caña de azúcar [21]. En el mismo se expone la existencia de sitios específicos, determinados mediante un muestreo de suelo a escala subcampo con 671 muestras de suelo. Junto a los pasos para el análisis geoestadísticos que permite llevar de valores puntuales a predicciones espaciales (figura 3), mediante la selección de modelos de semivariograma y *kriging* ordinario [21]. Del mapa expuesto por García-López y Orozco-Bravo, (2021) se escogió un campo con presencia de sitios específicos [21] y se realizó el análisis económico que es expuesto en este trabajo.



Fig. 3 - Diagrama conceptual para el análisis espacial del fósforo asimilable del suelo en el agrosistema azucarero [21].

2.3 Etapa de Valoración

Se presenta el análisis biofísico y económico de la variabilidad espacio-temporal y los Criterios de adaptación acorde con los resultados.

2.3.1 Análisis biofísico y económico de la variabilidad espacio-temporal

Se debe considerar a la valoración como un insumo clave para el entendimiento de sinergias y conflictos asociados a los procesos de soporte de los servicios ecosistémicos [7]. Así, la identificación de impactos relacionados con variabilidades espacio-temporales pueden mostrar costos por no adaptación de manejos. Esta consideración se presenta como un elemento básico para incorporar estimados económicos más precisos, así como hacer visible el estado y las tendencias de componentes del sistema, para la toma de decisiones. Es de resaltar que cada indicador explica un comportamiento en un espacio-tiempo, como tal puede ser analizado y predicho con las tecnologías y los conocimientos adecuados.

Las propiedades químicas del suelo originan diferentes dosis de fertilizantes. La cuestión radica en que no existen aplicaciones variables (hasta la fecha) para el manejo de fertilizantes, a escala de subcampo en el caso de estudio y las dosis se deben ajustar a una recomendación única a nivel de campo. Para el cálculo de la dosis única se considera la necesidad del área de mayor extensión entre los diferentes sitios específicos identificados. Lo que permite determinar la diferencia de aplicar esta, respecto a las necesidades específicas de cada sitio en las ecuaciones 1, 2 y 3.

$$CD = NNI * P \quad (1)$$

Donde

CD: costo de la dosis de fertilizantes (USD ha⁻¹)

NNI: necesidad de fertilizante identificada en el sitio específico (t ha⁻¹)

$$NNI = \frac{Dosis}{\%P_2O_5 \text{ en el fertilizantes}} * 100 \quad (2)$$

P: precio del fertilizante (USD t⁻¹)

PROCEDIMIENTO PARA VALORAR LA VARIABILIDAD ESPACIO-TEMPORAL EN UN PROCESO ECOSISTÉMICO DE SOPORTE

Dosis ($t\ ha^{-1}$)

Así, la determinación de perjuicio por variabilidad espacial (PVE) ($USD\ ha^{-1}$) será:

$$PVE = CD_u - CD_e \quad (3)$$

Donde

CD_u : representa el costo por la aplicación de fertilizantes a partir de dosis única aplicada al sitio específico ($USD\ ha^{-1}$).

CD_e : representa el costo por la aplicación de fertilizantes a partir de la necesidad del sitio específico ($USD\ ha^{-1}$).

De esta forma, valores en negativo de PVE significan déficit, mientras que valores positivos representan exceso de fertilizantes y solo donde $CD_u = CD_e$, la dosis es adecuada para el sitio específico.

El precio del fertilizante considerado (superfosfato triple) para cubrir las necesidades de fósforo fue: $531\ USD\ t^{-1}$.

Para los mapas, se utiliza el sistema de información geográfica (SIG) con el *software* QGIS versión 2.6

2.3.2 Criterios de adaptación acorde con los resultados

Todas las etapas precedentes del procedimiento deben servir de base para la inclusión de las variabilidades espacio-temporales de procesos y servicios ecosistémicos, en la toma de decisiones. En esta etapa, la combinación de cuantificación, valoración y análisis de referencias bibliográficas, puede permitir la identificación de riesgos y oportunidades de manejos sostenibles.

En la figura 4 se exponen métodos y componentes para la inclusión de las variabilidades espacio-temporales, lo que requiere de sistemas de información geográfica, software estadístico, análisis de laboratorios y equipos asociados.

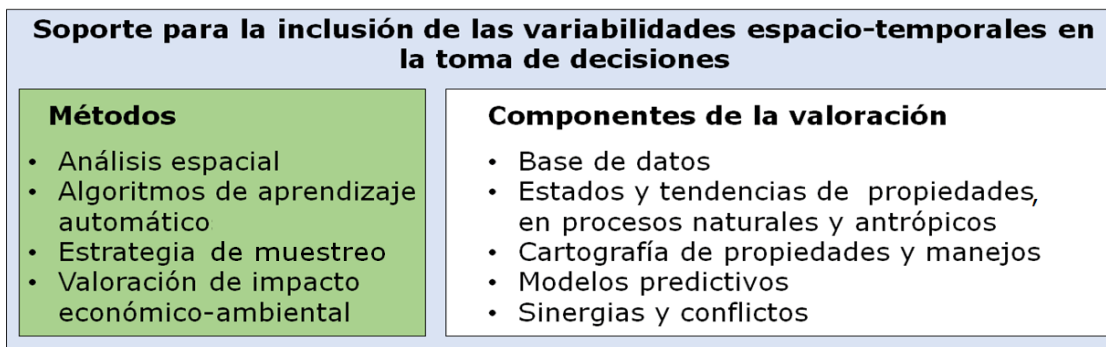


Fig. 4 - Marco conceptual para la inclusión de variabilidades espacio-temporales de procesos de soporte en la toma de decisiones.

Resultados

Se muestra un proceso de soporte de los servicios ecosistémicos. En este caso, la disponibilidad de nutrientes relacionada con el fósforo asimilable del suelo y se realiza una valoración de su variabilidad espacio-temporal.

3.1 Propiedad, proceso y servicio ecosistémico en el caso de estudio

La primera parte del procedimiento enfatiza en la identificación procesos que son la base de los servicios ecosistémicos y que pueden ser monitoreados mediante indicadores. En

este caso, se identifica al proceso de disponibilidad de nutriente, asociado a prácticas de fertilización y que comienza con la determinación de un contenido de fósforo asimilable en el suelo, el establecimiento de categorías y prosigue con las dosis de fertilizantes requeridas (figura 5).



Fig. 5 - Proceso y servicio ecosistémico para un contexto agroindustrial azucarero.

La aplicación de fertilizante fosfórico es un manejo de nutriente para el suelo, empleado restituir la extracción que realiza el cultivo en un área de producción agrícola. Los análisis geoestadísticos permiten la delimitación de sitios específicos para realizar estas incorporaciones al suelo. Sin embargo, son necesarias las tecnologías de dosis variables para, llevar a hechos, la adaptación a las variabilidades espacio-temporales de las propiedades del suelo.

3.2 Predicción geoestadística utilizada

Lo encontrado por García-López y Orozco-Bravo, (2021), es la existencia de diferentes categorías de fósforo asimilable del suelo, incluso dentro de un mismo campo de caña de azúcar [21] (figura 6); en ese trabajo se recogen las etapas de cuantificación y análisis geoestadístico, de utilidad para la valoración del impacto de las variabilidades espacio-temporales.

PROCEDIMIENTO PARA VALORAR LA VARIABILIDAD ESPACIO-TEMPORAL EN UN PROCESO ECOSISTÉMICO DE SOPORTE

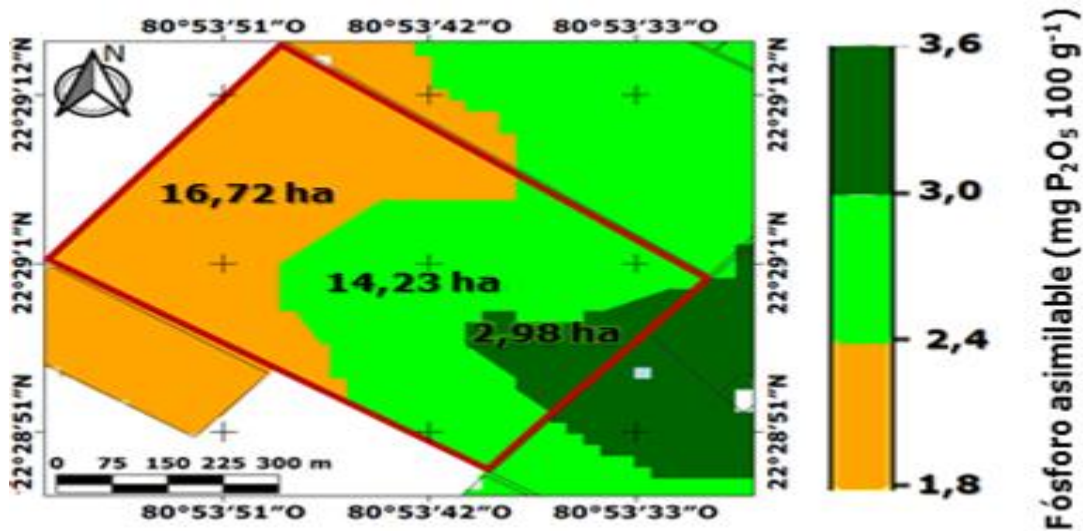


Fig. 6 - Variabilidad del fósforo asimilable dentro de un campo de caña de azúcar.

Fuente: Adaptado de García-López y Orozco-Bravo, (2021) [21].

3.3 Valoración económica de la variabilidad espacio-temporal

La ausencia de tecnologías de aplicaciones variables dentro del campo y la aplicación de una misma dosis de fertilizante, ocasiona exceso o déficit en el manejo de nutriente, según criterio seleccionado. Una lógica de pensamiento para la dosis única, puede ser la utilización del área de mayor representatividad, que en este caso es la de 16,72 hectáreas (ha) que corresponde al intervalo de 1,8 a 2,4 mg P₂O₅ 100g⁻¹. Un manejo acorde a esta categoría significa que las áreas de color verde (figura 6) recibirían mayores dosis que las necesitadas (figura 7). Según León *et al.*, (2015) las dosis para los tres intervalos expuestos (desde el naranja hasta el verde oscuro), son de 50; 40 y 30 kg P₂O₅ ha⁻¹ respectivamente [22].

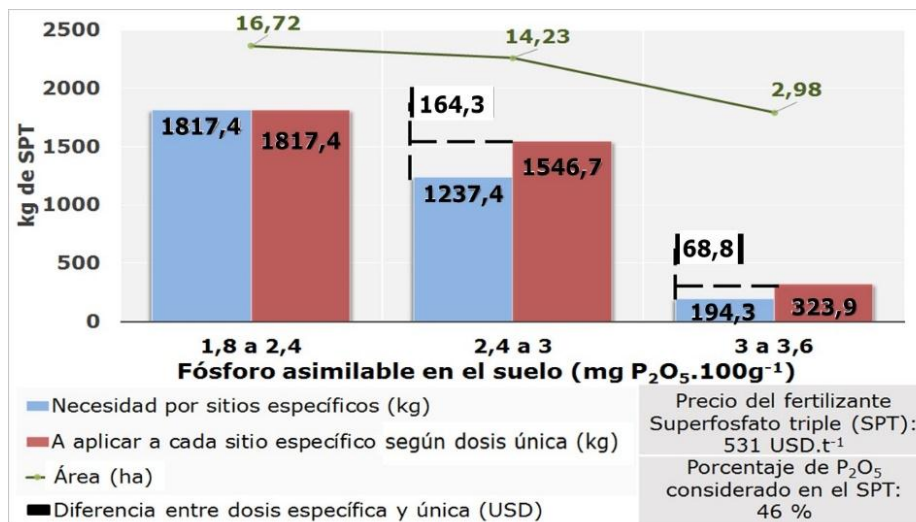


Fig. 7- Diferencias entre dosis específica y única para un campo de caña de azúcar.

De acuerdo con el criterio de variabilidad espacio-temporal de la propiedad del suelo; el proceso de fertilización a partir de una dosis única, implica en este caso un exceso de fertilizantes de 438,9 kg de Superfosfato Triple (SPT); lo que significa un costo, en Dólar Estadounidense (USD), de 233,1 de más. Sin embargo, como se aprecia en la figura 8, varios campos presentan diferentes combinaciones y no solo implican aplicaciones en exceso, sino en déficit. La figura 9 muestra el costo asociado a dosis de fertilizante.

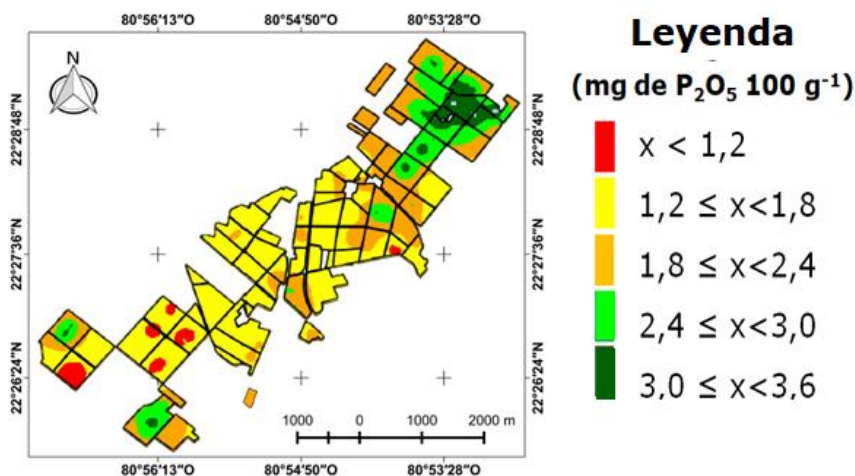


Fig. 8- Variabilidad espacio-temporal según García-López y Orozco-Bravo, (2021) [21].

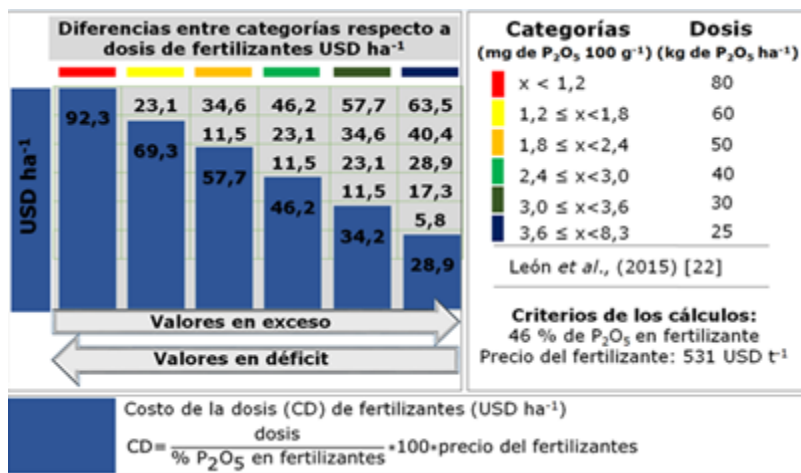


Fig. 9. Costo asociado a dosis de fertilizantes por categorías de fósforo asimilable.

En la figura 9 se establecen los costos de las dosis de fertilizantes (80, 60, 50, 40, 30, 25 kg ha⁻¹); los que se aprecian en las columnas azules. Mientras que las casillas en gris recogen las diferencias de aplicar una dosis errada. Es decir, una categoría de fósforo asimilable en el suelo menor que 1,2 mg 100g⁻¹ requiere de una dosis de 80 kg ha⁻¹ de P₂O₅ [22], si esta se aplica a un sitio específico que contiene un valor de 1,2 a 1,8 mg

PROCEDIMIENTO PARA VALORAR LA VARIABILIDAD ESPACIO-TEMPORAL EN UN PROCESO ECOSISTÉMICO DE SOPORTE

100 g⁻¹, se aplicaría 20 kg ha⁻¹ (equivale a 0,043 t ha⁻¹ de SPT) en exceso, lo que incurre en un costo del fertilizante de 23,1 USD ha⁻¹.

3.4 Consideraciones para la toma de decisiones

La toma de decisiones, debe ser el proceso intencional que combina el análisis de información, uso de la tecnología, evaluación de alternativas y la decisión en sí misma, para implementar estrategias e identificar la mejor alternativa que resuelve el problema [23].

Se evidencia que los manejos de nutrientes del suelo alejado de los criterios de sitios específicos, puede ocasionar excesos o déficit en las aplicaciones que se realizan. Junto a la económica, existen otros conflictos asociados a esta situación, con consecuencias para los servicios ecosistémicos. Por lo anterior, el proceso de toma de decisiones debe incluir las determinaciones y consideraciones para establecer los manejos de adaptación a corto, mediano y largo plazo (Tabla 1).

Tabla 1 - Impacto de excesos y déficit de fertilizantes por variabilidad espacio-temporal.

Causas	Consecuencias	Medidas
Falta de adaptación a la variabilidad espacio-temporal del fósforo asimilable	-Se pueden generar aplicaciones en excesos o déficit que impactan los procesos y servicios ecosistémicos para diferentes sitios dentro de un campo de caña de azúcar. Con intervención, en la absorción de otros elementos, tales como el hierro, el manganeso y el zinc; así como tallos más cortos y finos de la caña de azúcar [22]. -Eutrofización de lagos. También en la etapa industrial la relación de P ₂ O ₅ /N influye en la clarificación [22].	Decisión operativa -Determinación de fósforo por análisis foliar de la planta. -Determinación de fósforo asimilable y sitios específicos de manejos. -Aplicaciones de fertilizantes fosfóricos (acorde a las necesidades del cultivo y las categorías identificadas en el análisis químico de suelo) al momento de la plantación y en los retoños, inmediatamente después del corte. -Cobertura del campo con residuos de cosecha. Decisión estratégica Avanzar en: -Tecnologías de sensores remotos y proximales para identificación de sitios específicos -Tecnologías de aplicaciones variables de fertilizantes para mayor eficiencia en el manejo de adaptación a los sitios específicos

La incorporación de las variabilidades espacio-temporales en la toma de decisiones, puede contribuir con la sostenibilidad; por la identificación de estado y tendencias en propiedades, procesos y servicios ecosistémicos. En concordancia con esto, se definen

las siguientes preguntas clave, para una valoración de procesos de soporte del enfoque ecosistémicos, en el caso de estudio (tabla 2).

Tabla 2 - Preguntas claves que se dan respuesta en el caso de estudio sobre el estado y la variabilidad del fósforo asimilable del suelo.

Preguntas claves	Respuestas para el caso de estudio
¿Cuáles procesos o servicios ecosistémicos?	Disponibilidad de nutrientes
¿Qué potencia a los procesos o servicios ecosistémicos?	Estado y manejos de nutriente del suelo
¿Cómo valorar?	Cuantificar la variabilidad espacio-temporal de: fósforo asimilable (P_2O_5).
¿Cuál es la escala espacio-temporal?	Sub-campo
¿Tipo de muestras?	Muestra de suelo compuesta [21]
¿Cuáles son los estados?	Tres sitios específicos de fósforo asimilable del suelo [21]
¿Para qué se utiliza los resultados?	Valoración biofísica [21] y económica del impacto de la variabilidad espacio-temporal
¿Cuáles son los conflictos?	Conflictos entre estructuras antrópicas y variabilidad espacio-temporal del fósforo asimilable del suelo, con manejos de fertilizantes en exceso o en déficit según el estados considerado para aplicar una dosis única
¿Cuál es el impacto?	Falta de adaptación, del manejo, a sitios específicos en el campo, lo que puede generar afectaciones a ciclos de nutrientes y servicios ecosistémicos (Tabla 1)
¿Cuál es la estrategia?	Insertar las variabilidades espacio-temporales de procesos de soporte en las valoraciones, toma de decisiones y manejos para lograr una mejor adaptación y mitigación de los impactos económicos-ambientales (Tabla 1)

Discusión

Se han definido diversas formas para el estudio de los servicios ecosistémicos que se pueden agrupar, en valoraciones biofísicas, sociales y económicas [24]. El procedimiento propuesto se adentra en el contexto de las valoraciones biofísicas. El caso de estudio se basó en los valores fósforo asimilable del suelo, su variabilidad espacio-temporal y la valoración económica en función de la dosis de fertilizante que es requerida por sitio específico.

Los servicios ecosistémicos se presentan como una herramienta para hacer posible la realización de manejos sensibles a los problemas ambientales [25]. Este enfoque se ha convertido en la piedra angular del pensamiento contemporáneo sostenible [26]. Con múltiples aplicaciones para la toma de decisiones. La cuantificación en el enfoque ecosistémico con el empleo de métodos biofísicos se han utilizado para una variedad de propósitos: manejo del paisaje, contabilidad del capital natural, incremento de conocimientos y diseño de políticas [27]. Los métodos incluyen mediciones, programas de monitoreo, mapeo de actividades, entrevistas a expertos y análisis estadísticos [12]. En el caso que ocupa, la etapa de analítica predictiva consolida la cuantificación de las propiedades, análisis y predicción para conocer un comportamiento espacio-temporal. Es

PROCEDIMIENTO PARA VALORAR LA VARIABILIDAD ESPACIO-TEMPORAL EN UN PROCESO ECOSISTÉMICO DE SOPORTE

fundamental para el procedimiento el uso de indicadores y su relación con manejos agrícolas. Para el caso de áreas de caña de azúcar es de utilidad los algoritmos de fertilización desarrollados por el Instituto de Investigaciones de la Caña de Azúcar (INICA), que disponen la cantidad de fertilizantes que debe ser utilizada para cada categoría de fósforo asimilable del suelo [22]. También esta etapa se beneficia de la estadística, geoestadística, así como el desarrollo de los algoritmos de aprendizajes automáticos, sistemas de información geográfica, entre variadas técnicas actuales para el procesamiento de datos y el reconocimiento de patrones que pueden predecir comportamiento de propiedades, procesos y servicios ecosistémicos; además de generar conocimientos básicos que pueden ser empleados en la toma de decisiones para sitios específicos.

Para las variabilidades espacio-temporales de propiedades manejables del suelo, existirá mayor o menor eficiencia de los procesos, en dependencia del rigor con que se trabaje, de las dimensiones del área, del error permisible que se acepte, de los recursos con que se cuente para diagnosticar y poder además, aplicar recomendaciones variables; así como de las regulaciones y la conciencia que puedan existir para considerar las características variables del agrosistema en la toma de decisiones. Según Birgé *et al.*, (2016), monitorear las variables del suelo ayuda a explorar los cambios que pueden afectar a los servicios ecosistémicos, además del establecimiento de los sitios específicos y las recomendaciones para mitigar las limitantes con criterios sostenibles [28]. Lo que convierte a las propiedades del suelo en características ambientales fundamentales asociadas al manejo del agrosistema azucarero. Este sistema persigue la obtención de azúcar; un servicio ecosistémico de provisión [29], dependiente de las propiedades del suelo e influenciado por diferentes manejos [30; 31]. Las aplicaciones de fertilizantes es uno de los manejos utilizados con frecuencia en la agricultura, para reponer los nutrientes, que son extraídos por sucesivas cosechas [32]; pero deben ser aplicados de forma racional para evitar impactos ambientales [33].

La figura 9 expone las diferencias entre las categorías de fósforo asimilable, que se establecen en León *et al.*, (2015) [22], y exhibe diferentes valores económicos por excesos o déficit de fertilizantes. Este análisis aborda la importancia de las valoraciones espacio-temporales para transitar a manejos nutrientes por sitios específicos en el suelo. Sin embargo, esto ha sido posible por la existencia de investigaciones precedente [21; 22]. En una gestión empresarial basada en ciencia, los diversos procesos que requieren de un manejo para la obtención de los servicios ecosistémicos deben ser investigados en detalle, como es el caso analizado en este trabajo. El manejo de nutrientes del suelo requiere de tener respuestas a importantes preguntas: ¿Qué aplicar? ¿Dónde aplicar? ¿Cuánto aplicar? ¿Cuándo aplicar? ¿Cómo aplicar? Lo que fue posible en el manejo del fósforo asimilable del suelo, por la existencia de un algoritmo de fertilización para caña de azúcar y la determinación de los sitios específicos a escala sub-campo en el área de estudio [21; 22].

La valoración de propiedades, procesos y servicios ecosistémicos en un contexto agroindustrial azucarero deben reconocer las variabilidades espacio-temporales y buscar mayor eficiencia en la adaptación, para transitar a escenarios sostenibles. Debido a que los excesos y déficit de fertilizantes pueden afectar a los servicios ecosistémicos (Tabla 1). La aplicación del procedimiento propuesto debe constituir un marco de trabajo que

synthetic elements fundamental, analytical, predictive and valuations for the taking of decisions; where the response to 10 key questions (Table 2) can serve as a guide.

Conclusiones

1. Se aporta un procedimiento para realizar la valoración de la variabilidad espacio-temporal del fósforo asimilable con un enfoque ecosistémico. El mismo contó de tres etapas y seis pasos que se interrelacionan para garantizar una adecuada coherencia en fundamentación, analítica predictiva y la valoración que da insumos para la toma de decisiones.
2. De acuerdo con la variabilidad espacio-temporal, el manejo del fósforo a partir de una dosis única implica, para el campo valorado, un exceso de fertilizantes de 438,9 kg de SPT, lo que significa un costo de 233,1 USD.
3. Se evidencia la importancia de la variabilidad espacio-temporal y del manejo de adaptación que evite costos económicos por exceso o déficit de fósforo asimilable, así como de impactos en los servicios ecosistémicos que deben ser considerados por la toma de decisiones, para transitar a escenarios sostenibles.

REFERENCIAS

1. WAWERU, P.; BURKHARD, B.; MULLER F. "A review of studies on ecosystem services in Africa". International Journal of Sustainable Built Environment. 2016. (5): 225-245. ISSN 2212-6090 DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijbe.2016.08.005>.
2. COSTANZA, R.; ET AL. "The Value of the World's Ecosystem Services and Natural Capital". Nature. 1997, (387): 253-260. Disponible en: http://www.esd.ornl.gov/benefits_conference/nature_paper.pdf [Recuperado: 12 febrero 2015]
3. DE GROOT, R.; BRAAT, L.; COSTANZA, R. "A short history of the ecosystem services concept". En: Burkhard B, Maes J (Eds.) Mapping Ecosystem Services. 2017. Bulgaria: Pensoft Publishers. 31-34. ISBN: 978-954-642-830-1
4. DOMINATI, E., MACKAY, A., GREENB, S., Y PATTERSONC, M. "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". Ecological Economics. 2014. (100): 119-129. ISSN: 0921-8009. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2014.02.008>
5. BASTIAN, O.; GRUNEWALD, K. "Properties, Potentials and Services of Ecosystems". En: Grunewald, K.; Bastian, O. (eds) Ecosystem Services – Concept, Methods and Case Studies. 2015. Berlin: Springer-Verlag. 36-45. ISBN: 978-3-662-44143-5. DOI: 10.1007/978-3-662-44143-5_3
6. VILLASANTE, S., LOPES, P., COLL, M. "The role of marine ecosystem services for human well-being: Disentangling synergies and trade-offs at multiple scales". Ecosystem Services. 2016. (17): 1-4. ISSN: 2212-0416. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoser.2015.10.022>
7. RINCÓN-RUIZ, A.; ECHEVERRY-DUQUE, M.; PIÑEROS, A. M.; TAPIA, C. H.; DAVID, A. ZULUAGA, P. A. "Valoración integral de la biodiversidad y los servicios

PROCEDIMIENTO PARA VALORAR LA VARIABILIDAD ESPACIO-TEMPORAL EN UN PROCESO ECOSISTÉMICO DE SOPORTE

- ecosistémicos: Aspectos conceptuales y metodológicos". 2014. Bogotá, D. C. Colombia: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH). ISBN: 978-958-8889-04-7. Disponible en: http://www.iai.int/admin/site/sites/default/files/uploads/2015/08/VIBSE_2014_1.pdf [Recuperado: 4 diciembre 2019]
8. VANG L., MERTZ O, CHRISTENSEN A., DANIELSEN F, DAWSON N, XAYDONGVANH, P. "A combination of methods needed to assess the actual use of provisioning ecosystem services". *Ecosystem Services*. 2016. (17): 75–86. ISSN: 2212-0416. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoser.2015.11.005>
 9. KEITH A., SCHMIDT O, MCMAHON B. "Soil stewardship as a nexus between Ecosystem Services and One Health". *Ecosystem Services*. 2016. (17): 40–42. ISSN: 2212-0416. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoser.2015.11.008>
 10. SUNDERLAND, T. Y BUTTERWORTH, T. "Meeting local economic decision-maker's demand for environmental evidence: The Local Environment and Economic Development (LEED) toolkit". *Ecosystem Services*. 2016. (17): 197–207. ISSN2212-0416. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoser.2015.12.007>
 11. REGA, C. *Ecological Rationality in Spatial Planning. Concepts and Tools for Sustainable Land-Use Decisions*. Springer Nature. 2020. Switzerland. ISBN: 978-3-030-33027-9. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-33027-9>
 12. GRUNEWALD, K.; BASTIAN, O.; SYRBE, R.-U. "Space and Time Aspects of ES" En Grunewald, K. y Bastian, O. (eds.) *Ecosystem Services – Concept, Methods and Case Studies*. 2015. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag. 53-65. ISBN: 978-3-662-44143-5. DOI: 10.1007/978-3-662-44143-5
 13. POTSCHIN, M.; HAINES-YOUNG, R. "From nature to society". En: Burkhard B, Maes J (Eds.) *Mapping Ecosystem Services*. 2017. Sofia, Bulgaria: Pensoft Publishers. 41-43. ISBN: 978-954-642-830-1
 14. GONDKAR, S.; SREERAMAGIRI S.; ZONDERVAN, E. "Methodology for Assessment and Optimization of Industrial Eco-Systems. Challenges". 2012. (3): 49-69. ISSN: 2078-1547. DOI:10.3390/challe3010049.
 15. VIHERVAARA, P.; MONONEN, L.; SANTOS, F.; ADAMESCU, M.; CAZACU, C.;...; MAES, J. "Biophysical quantification". En: Burkhard B, Maes J (Eds.) *Mapping Ecosystem Services*. 2017. Sofia, Bulgaria: Pensoft Publishers. Capítulo 4. ISBN: 978-954-642-830-1.
 16. CORD, A.; SCHWARZ, N.; SEPPELT, R.; VOLK, M.; SCHRÖTER, M. "Introduction to Part III: Trade-Offs and Synergies Among Ecosystem Services". En: Schröter et al. (eds) *Atlas of Ecosystem Services*. 2019. Cham, Switzerland: Springer International Publishing AG. 245- 248. ISBN: 978-3-319-96229-0. DOI: <doi.org/10.1007/978-3-319-96229-0>
 17. GONZÁLEZ-ESQUIVEL;C. E., G.;M. E., A.;M., C.-S.;M., D.-V.;E., V.-E., et al. "Ecosystem service trade-offs, perceived drivers, and sustainability in contrasting agroecosystems in central Mexico". *Ecology and Society*. 2015;20(1):38. ISSN 1708-3087
 18. WILLCOCK, S.;MARTÍNEZ-LÓPEZ, J.;HOOFTMAN, D.;BAGSTAD, K.;BALBI, S.;ATHANASIADIS, I. "Machine learning for ecosystem services". *Ecosystem Services*. 2018(33):165-74. ISSN 2212-0416

19. WILLCOCK, S.; MARTÍNEZ-LÓPEZ, J.; HOOFTMAN, D.; BAGSTAD, K.; BALBI, S.; ATHANASIADIS, I. "Machine learning for ecosystem services". *Ecosystem Services*. 2018(33):165-74. ISSN 2212-0416
20. JAMES, G.; WITTEN, D.; HASTIE, T.; TIBSHIRANI, R. "An Introduction to Statistical with Applications in R.". USA: Springer; 2021. ISBN 978-1-0716-1417-4
21. GARCÍA-LÓPEZ, Y.; OROZCO-BRAVO, M. "Análisis geoestadístico como base para contribuir al manejo sostenible del agrosistema azucarero". *Ingeniería Industrial*. 2021; XLII(2):1-14. ISSN 1815-5936.
22. LEÓN, M.; PÉREZ, H.; VILLEGAS, R. *Nutrición y Fertilización. Manejo Sostenible de Tierras en la Producción de Caña de Azúcar*. 2. Ecuador: Ediciones UTMACH; 2015.
23. AHUMADA-TELLO, E.; CASTAÑÓN-PUGA, M.; GAXIOLA-PACHECO, C.; EVANS, R. D. *Applied Decision Making in Design Innovation Management. Applied Decision-Making Applications in Computer Sciences and Engineering*. Springer Nature Switzerland 2019. p. 95-114.
24. GABA, S., ET AL. "Multiple cropping systems as drivers for providing multiple ecosystem services: from concepts to design". *Agron. Sustain* 2015; (35). 607-623. ISSN 1773-0155. DOI: 10.1007/s13593-014-0272-z.
25. MUDDIMAN, S. "Ecosystem Services. Economics and Policy. Palgrave Studies in Natural Resource Management". Switzerland: Springer Nature; 2019. ISBN 978-3-030-13819-6
26. Bull, J.W; ET. AL. "Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats: A SWOT analysis of the ecosystem services framework". *Ecosystem Services*. 2016. (7): 99-111. ISSN: 2212-0416. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoser.2015.11.012>
27. VIHERVAARA, P.; MONONEN, L.; SANTOS, F.; ADAMESCU, M.; CAZACU, C.;...; MAES, J. "Biophysical quantification". En: Burkhard B, Maes J (Eds.) *Mapping Ecosystem Services*. 2017. Sofia, Bulgaria: Pensoft Publishers. Capítulo 4. ISBN: 978-954-642-830-1
28. BIRGÉ, H.E.; BEVANS, R.A.; ALLEN, C.R.; ANGELER, D.G.; BAER, S.G.; WALL, D.H. "Adaptive management for soil ecosystem services". *J. Environ. Manag.* 2016. (183): 371-378. ISSN: 0301-4797. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.06.024>
29. GARCÍA, Y.; GONZÁLEZ, L. Y.; CABRERA, J. A. "Aplicaciones de aprendizaje automático para el análisis industrial de la provisión azucarera en Matanzas, Cuba". *Rev UDCA Act & Div Cient*. 2022;25(2). ISSN 2019-2551
30. ADHIKARI, K.; HARTEMINK, A. "Linking soils to ecosystem services. A global review". *Geoderma*. 2016;262:101-11. ISSN 0016-7061
31. PAL, D. K. "Ecosystem Services and Tropical Soils of India". Switzerland: Springer; 2019. ISBN 978-3-030-22710-4
32. AHMAD, A. F., Y HUSSAIN, A. *Precision Farming for Resource Use Efficiency. Resources Use Efficiency in Agriculture*. Singapore: Springer; 2020. p. 109-36. ISBN 978-981-15-6952-4

PROCEDIMIENTO PARA VALORAR LA VARIABILIDAD ESPACIO-TEMPORAL EN UN PROCESO ECOSISTÉMICO DE SOPORTE

33. KARAGÖZ, I. "Fertilization and Fertilizer Types. In: Inamuddin et al. (Eds.), Applied Soil Chemistry". 2021. USA: John Wiley & Sons. 123-148. ISBN: 978-1-119-71018-9. DOI:10.1002/9781119711520

Los autores declaran que no hay conflicto de intereses

Contribución de cada autor:

Yasmany García-López: Contribución realizada al trabajo: Elaboración de la idea de investigación, recopiló los datos, analizó los resultados y redactó el artículo.

Juan Alfredo Cabrera-Hernández: Contribución realizada al trabajo: Participó en la elaboración de la idea de investigación, en el análisis de los resultados, en la redacción y revisión del artículo.