

## Uso de fertilizantes en el mundo en las últimas seis décadas

### Fertilizer use in the world over the last six decades

Fernando Restrepo-Betancur<sup>1</sup>, Juan Carlos Salazar-Hernández<sup>2</sup>, Luis Miguel Mejía-Giraldo<sup>3</sup>.

<sup>1</sup> Esp. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia. frbstatistical@yahoo.es  <http://orcid.org/0000-0002-8583-5028>. Grupo STATISTICAL.

<sup>2</sup> Ph. D. Gobernación de Antioquia, Medellín, Colombia.  <https://orcid.org/0000-0002-3733-6515>. juan.salazar@antioquia.gov.co. Grupo STATISTICAL.

<sup>3</sup> MSc. Universidad la Gran Colombia, Armenia, Colombia. Correo: mejiagluismiguel@miugca.edu.co.  <http://orcid.org/0000-0003-2940-0111>. Grupo STATISTICAL.

Cite this article as: F. Restrepo-Betancur, J. Carlos Salazar, L. Mejía-Giraldo "Uso de fertilizantes en el mundo en las últimas seis décadas", Prospectiva, Vol. 24 N° 2 2026

Recibido: 10/05/2025 / Aceptado: 04/05/2026

### RESUMEN

Los nutrientes y la materia orgánica presentes en el suelo o incorporados mediante fertilizantes contribuyen a la reposición de la fertilidad, favoreciendo el crecimiento y desarrollo vegetal. Su empleo ha sido preponderante, incrementando los rendimientos agrícolas en cerca de un 50% en el último siglo, aunque también han generando problemas de contaminación y salud. El objetivo de este estudio fue evaluar el uso de fertilizantes en el mundo durante las últimas seis décadas. Se emplearon las bases de datos de la FAO, ONU, Our World in Data, USDA, IFA y Banco Mundial. Las variables analizadas incluyeron: uso de fertilizantes por hectárea, aporte de nitrógeno, producción por nutriente y exceso de fósforo por hectárea. Se aplicó el **MODELO LINEAL GENERAL** mediante la técnica **MANOVA**. Se detectó diferencia altamente significativa entre las diferentes regiones del mundo, donde Asia diverge estadísticamente respecto a las demás zonas. El uso de fertilizantes sin un debido control y de manera desequilibrada y sin tener claro las propiedades de dichos insumos, afecta definitivamente la calidad de los suelos, si se usa en cantidades insuficientes disminuye el rendimiento y la capacidad productiva y si hay un exceso en su aplicación puede llegar incluso a contaminar el medio ambiente.

**Palabras clave:** abono, estadísticas agrícolas, impacto ambiental, planta, suelo.

## ABSTRACT

Nutrients and organic matter present in the soil or incorporated through fertilizers contribute to restoring fertility, promoting plant growth and development. Their use has been prevalent, increasing agricultural yields by nearly 50% in the last century, although they have also generated pollution and health problems. The objective of this study was to evaluate fertilizer use worldwide over the last six decades. Databases from the FAO, UN, Our World in Data, USDA, IFA, and the World Bank were used. The variables analyzed included fertilizer use per hectare, nitrogen input, production per nutrient, and excess phosphorus per hectare. The **GENERAL LINEAR MODEL** was applied using the **MANOVA** technique. Highly significant differences were detected between the different regions of the world, with Asia diverging statistically from the other regions. The uncontrolled and unbalanced use of fertilizers, without a clear understanding of the properties of these inputs, definitely affects soil quality. If used in insufficient quantities, it reduces yield and productive capacity, and if applied excessively, it can even pollute the environment.

**Keywords:** fertilizer, agricultural statistics, environmental impact, plant, soil.

## 1. INTRODUCCIÓN

La capacidad natural fundamentada en gran parte en las condiciones físico-químicas y microbiológicas que pueda tener el suelo para brindar los compuestos nutritivos necesarios en las cantidades correctas a los cultivos y cuando elementos abióticos como la luz, la humedad y temperatura, entre otros factores externos son favorables, se reconoce como fertilidad, que es la que hace posible el crecimiento, desarrollo y producción de alimentos para bien de la humanidad. Cuando estas circunstancias no se dan y se afecta por lo tanto dicha capacidad del suelo, siendo necesario considerar el buen uso y manejo de los fertilizantes, tanto de carácter orgánico como de materiales inorgánicos diferentes a la cal y el yeso, los cuales pueden ser naturales o manufacturados que se requieren para que las plantas puedan reponer los nutrientes necesarios que garanticen su crecimiento [1]. Sin embargo, la misma intervención agrícola al sustituir procesos biológicos con insumos externos, afecta el reciclaje natural de los nutrientes en el suelo que es parte integral de la dinámica y el desarrollo de los agroecosistemas, puesto que incide sobre otras propiedades del suelo mutuamente dependientes como la prestación de servicios ecosistémicos [2]. Es muy común que los fertilizantes sean considerados como la principal fuente de abastecimiento nutricional en los cultivos, por ello es preponderante mantener un equilibrio y balance de dichos elementos y hacer un constante seguimiento que permita verificar la eficiencia de su uso, esto teniendo en cuenta que, si se aplican de manera excesiva o deficitaria, la producción y calidad de los cultivos se ve afectada [3-5]. Principalmente cuando se utilizan en forma indebida fertilizantes nitrogenados y fosfatados [6].

Existe una serie de factores que de alguna manera disminuyen la calidad de los suelos y afectan su capacidad de producción de alimentos, entre ellos, factores asociados a una fertilización incompleta o desequilibrada, debido en parte al alto costo de manejo y por ende poco uso y reconocimiento de los fertilizantes orgánicos que no están al alcance de todos los productores agrarios [7], así como por las malas prácticas en el uso intensivo de fertilizantes sintéticos que consumen altas cantidades de materias primas, entre ellos, recursos naturales, energía y combustibles fósiles [8]. Se destacan a nivel mundial en este orden de ideas, la sobreexplotación de áreas dedicadas a la producción de productos para la exportación por parte de países desarrollados de Asia y de América, sobresaliendo la producción de alimentos procesados y con destino animal [7-8], que demandan un alto uso de fertilizantes cuyas materias primas a pesar de la volatilidad de los precios, tienden a aumentar en el tiempo su valor, desencadenando en mayores costos de producción, entre ellos los de energía, destacándose el amoníaco precursor de los fertilizantes nitrogenados, como el segundo mayor consumidor de energía. Para optimizar el uso y la calidad del suelo, el sector agrícola debe mejorar la conservación y el almacenamiento del carbono orgánico, más si se tiene en cuenta que cuando se utilizan y aplican fertilizantes químicos inorgánicos,

estos tienen una incidencia directa y afectan a largo plazo no solo la fertilidad de la tierra a cultivar, sino también la productividad de los cultivos [7].

Los suplementos que trasmite el suelo a las plantas se clasifican en dos categorías: macronutrientes y micronutrientes, los cuales suman un total de diez y siete suplementos, así: los macronutrientes más predominantes, son nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, azufre, magnesio, oxígeno, hidrógeno, carbono, y los micronutrientes son hierro, boro, cloro, manganeso, zinc, cobre, molibdeno y níquel. Los fertilizantes ayudan a la revitalización de la tierra y por lo tanto aportan suplementos necesarios para el mejor y efectivo desarrollo de las plantas, en este sentido conjuntamente, los abonos naturales y los minerales son de gran utilidad en esa repotencialización [9]. El nitrógeno, por ejemplo, es un nutriente que ejerce un papel importante al facilitar la fotosíntesis, aportando así al mayor impacto verde; por su parte para estimular el crecimiento de las raíces se utiliza el fósforo que además contribuye a la transferencia de energía al interior de las plantas; adicionalmente estimula la floración y fructificación, donde el nutriente ideal es el potasio [10]. El nitrógeno se suministra ya sea como amoníaco anhidro, urea y nitrato de urea-amonio o en combinación con fósforo. El fósforo por su parte, se suministra comúnmente como fosfatos, incluido el fosfato monoamónico o fosfatos más complejos como la estruvita o la hidroxapatita de fosfato de calcio [11]. El papel de los fertilizantes ha sido durante el siglo XX preponderante, logrando un aumento cercano al 50% en el rendimiento de los cultivos. Su impacto, se calcula que al no aplicar fertilizantes nitrogenados, disminuiría el 40% el rendimiento medio de los cultivos de maíz, mientras que ese declive se estima entre el 40-57% para trigo [6].

A pesar de su importancia y el impacto positivo en el proceso de producción agrícola por parte de los fertilizantes, la emisión de óxido nitroso generado en la agricultura intensiva, propicia el calentamiento global [4]; igual sucede con el amoníaco donde los procesos mal desarrollados en la agricultura convencional, son responsables por un 80 a 95% de las emisiones totales a la atmósfera [6]. De una y otra forma, ambos contribuyendo a la formación de partículas secundarias precursores de los aerosoles y a la acidificación de suelos y eutroficación del agua por deposición [11-12]. Adicionalmente se reconoce que el uso excesivo de los fertilizantes y su acumulación creciente en el suelo afecta la calidad productiva y nutricional del mismo, deteriorando la biomasa y la actividad de algunos microorganismos que facilitan el incremento y la circulación de nutrientes [13]. En este sentido y ante el hecho de que hoy en día es un reto de gran importancia para el sector agrícola mejorar su capacidad productiva con el fin de atender adecuadamente la demanda de alimentos que exige el crecimiento de la población mundial, es menester el uso sostenible y eficiente de los fertilizantes y de relevancia la proposición de enfoques e investigaciones en tal sentido que disminuyan las implicaciones negativas por el coste en uso de recursos no renovables y energía y las afectaciones que durante su proceso de fabricación y aplicación generan, especialmente la emisión de gases efecto invernadero, siendo responsable el sector del 15 al 20% del total global mundial [11, 14]. El sector agrario necesita con urgencia definir una propuesta global que se adapte a las exigencias de desarrollo sostenible y uso adecuado del suelo y asignación de las tierras [15]. Este es, sin duda, uno de los problemas en los cuales deben centrar su accionar las políticas públicas conjuntamente con las investigaciones de eficiencia económica y ambiental para garantizar la implementación de soluciones efectivas [16].

La relación entre la producción de alimentos, el uso de fertilizantes y la economía rural exige estrategias, tanto gubernamentales como del sector privado, tendientes a ser equilibradas con el fin de que garanticen la seguridad alimentaria. Más allá de elevar el rendimiento, los fertilizantes nutren el suelo y corrigen la falta de nutrientes esenciales para los cultivos, por lo tanto, su aplicación técnica es fundamental para la sostenibilidad agrícola. Entender la perspectiva del productor es clave, con el ánimo de conocer qué aspectos se correlacionan con la demanda de los insumos, permitiendo fomentar prácticas más eficientes y

responsables. Aplicar nutrientes de forma oportuna no solo mejora la productividad y condiciones económicas de los agricultores, además permite asegurar la viabilidad del suelo para el futuro [17].

Como una buena alternativa para preservar el ecosistema existen los fertilizantes orgánicos que son insumos derivados de fuentes vegetales, animales o microbianas, los cuales se emplean con el objetivo de potenciar la fertilidad del suelo y el desarrollo de los cultivos. Estos abonos aportan una cantidad significativa de micronutrientes, además de elementos esenciales como nitrógeno, fósforo y potasio, abarcando desde el compost y el estiércol hasta los biofertilizantes [18]. Los fertilizantes orgánicos son empleados en la agricultura orgánica como fuente de nutrición para diversos cultivos con el ánimo de obtener alimentos de calidad y mejorarlas las condiciones tanto físicas como químicas del suelo, de igual forma impacta positivamente en la biodiversidad y el medio ambiente [19].

El objetivo del estudio fue evaluar y comparar estadísticamente el uso de fertilizantes en el mundo en las últimas seis décadas.

La hipótesis nula está referida a que no existe divergencia estadística entre regiones en la cantidad promedio empleada de los diferentes tipos de fertilizante evaluados. La hipótesis alternativa es que al menos una región presenta diferencias.

## 2. METODOLOGÍA

El estudio es de tipo descriptivo comparativo de tipo longitudinal. La información fue extractada de la FAO [20], ONU [21], *Our World in Data* [22], *United States Department for Agriculture* (USDA) [23], Banco Mundial [24], *IFASTAT Plant Nutrition Query* [25]. Las variables evaluadas fueron: uso de fertilizantes por hectárea de cultivo, aporte total de nitrógeno, producción de fertilizantes por tipo de nutriente, exceso de fosforo por hectárea, uso de fertilizantes frente al PIB per cápita, población que depende de los fertilizantes nitrogenados sintéticos, consumo total de fertilizantes.

Se aplicó el **MODELO LINEAL GENERAL** mediante el empleo de la técnica multivariada **MANOVA** con contraste canónico ortogonal. En el proceso estadístico de la información se utilizó el paquete estadístico SAS University al igual que Python. La elección de la técnica multivariada citada anteriormente se justifica por la naturaleza interdependiente de las variables analizadas (uso de los distintos tipos de fertilizantes, emisiones de  $N_2O$  y PIB per cápita) y el tipo de estudio de carácter longitudinal. A diferencia de un análisis univariado, el **MANOVA** permite evaluar la disparidad entre regiones a través del tiempo considerando la estructura de correlación entre las variables de manera simultánea, lo que reduce el error de tipo I y proporciona una visión integral de la divergencia regional. El contraste canónico ortogonal se aplicó para identificar con precisión qué dimensiones o combinaciones de variables explican la máxima variabilidad entre los grupos, permitiendo establecer el contraste estadístico específico entre regiones del mundo, con el fin de detectar donde se localiza la disparidad entre zonas geográficas a nivel orbital. De manera adicional se utilizó la técnica no paramétrica de Spearman a fin de detectar correlaciones entre regiones.

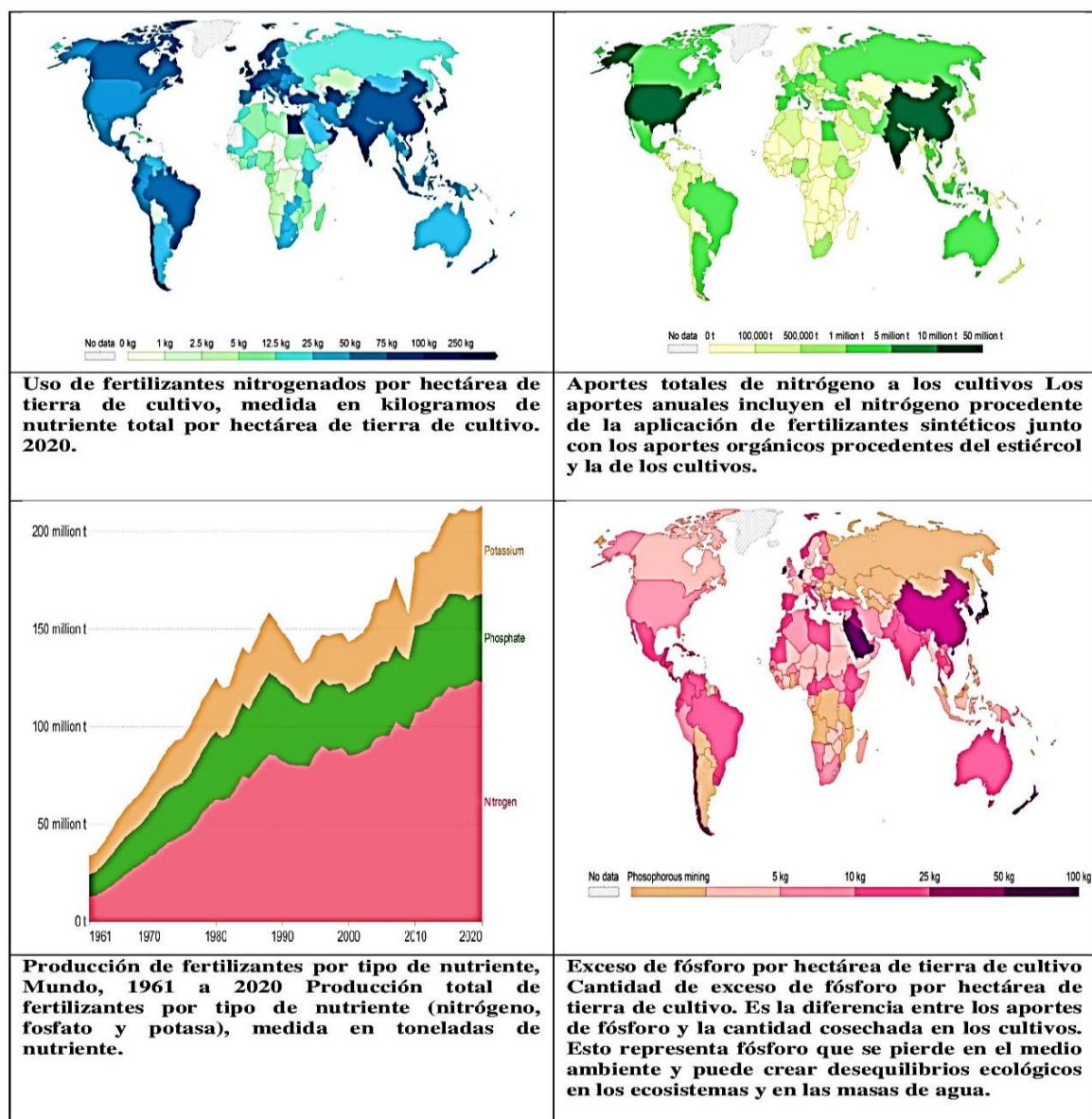
## 3. RESULTADOS

La Figura 1 presenta una proyección gráfica asociada a la dinámica global de uso y aplicación de fertilizantes entre los años 1961 al 2020, evidenciando un crecimiento exponencial en la producción de nutrientes donde el nitrógeno predomina sobre el fosfato y el potasio, superando los 100 millones de toneladas anuales. A nivel mundial, se aprecia una heterogeneidad significativa en la intensidad de uso, con altas concentraciones de fertilizantes nitrogenados por hectárea en regiones de agricultura intensiva como el este de Asia, Europa y partes de América. Esta dinámica se refleja en los aportes totales de

nitrógeno, que integran fuentes sintéticas y orgánicas, destacando a China, India y Estados Unidos como las principales naciones de aplicación masiva de fertilizantes. Se detecta relación entre el uso intensivo y el exceso de fósforo por hectárea, particularmente en naciones industrializadas y en países de economías emergentes, lo que indica una ineficiencia en la absorción de los cultivos. Este excedente, que alcanza niveles superiores a los 50 kg/ha en zonas críticas, representa una pérdida neta hacia el medio ambiente que amenaza la estabilidad de los ecosistemas acuáticos mediante procesos de eutrofización.

**Figura 1.** Panorama mundial relacionado con el uso de fertilizantes.

**Figure 1.** Global overview of fertilizer use.



Fuente: elaboración propia con base en la información reportada por *Our World in Data* [22], *United States Department of Agriculture* (USDA) [23].

La Tabla 1 expone las tendencias relacionadas con el crecimiento referente al uso de fertilizantes nitrogenados y su impacto directo en las emisiones de óxido nitroso ( $N_2O$ ) durante las últimas dos décadas. Se observa un contraste notable en las economías asiáticas, donde China presenta una transición hacia la sostenibilidad con tasas negativas de crecimiento en el uso de fertilizantes y emisiones de  $N_2O$  entre los años 2011 al 2020. Tayikistán y Myanmar, muestran un incremento notorio asociado al uso de nitrógeno que supera el 30%, lo que ha incidido en las emisiones de gases de efecto invernadero de manera desproporcionada. En Latinoamérica, Brasil, Argentina y Uruguay mantienen un crecimiento sostenido, con tasas de variación en el uso de fertilizantes que oscilan entre el 7% y el 10%, reflejando una intensificación de sus modelos agroexportadores. En Azerbaiyán, el aumento del 15.3% en el uso de fertilizantes incidió en una variación del 84.3% en las emisiones de  $N_2O$  en la última década, evidenciando una baja eficiencia en la gestión del nitrógeno. Esta heterogeneidad geográfica infiere que, mientras algunas potencias logran mejorar la producción agrícola minimizando el impacto ambiental, otras regiones no velan por posibilitar la estabilidad climática en pro de la expansión productiva. La correlación directa entre el insumo químico y el residuo gaseoso en los países analizados, subraya la urgencia de implementar estrategias de agricultura de precisión a escala global.

**Tabla 1.** Países con mayor crecimiento en las últimas dos décadas (2001-2020) en el consumo de Nitrogenados y su variación de emisión de  $N_2O$

**Table 1.** Countries with the highest growth in the last two decades (2001-2020) in the consumption of Nitrogens and their variation in  $N_2O$  emissions

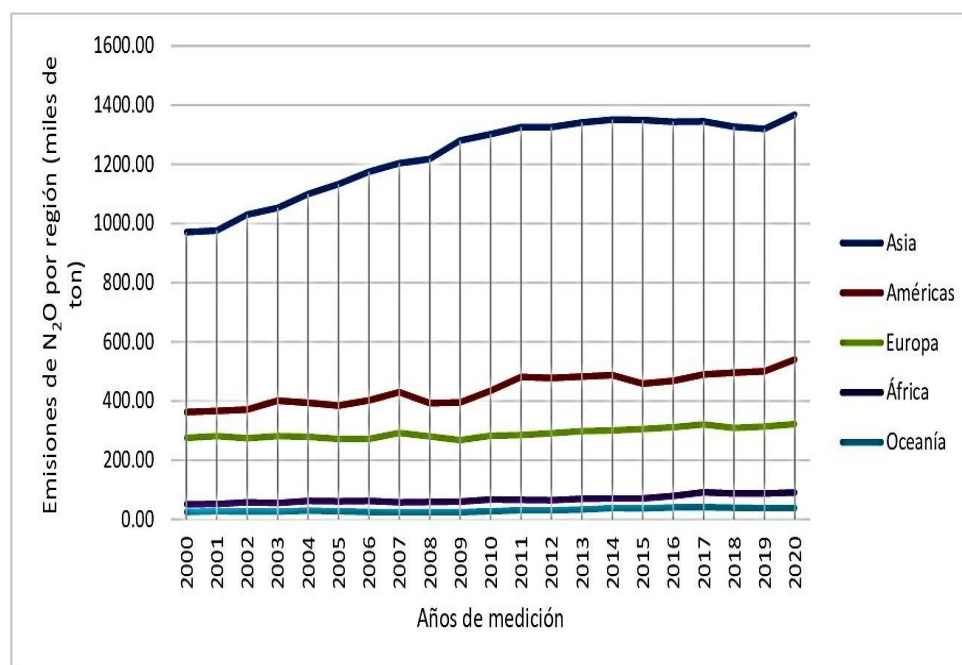
| País       | Crecimiento (%) anual de fertilizantes nitrogenados en todas sus formas | Variación (%) del crecimiento anual de emisión de $N_2O$ (2011-2020) | Variación (%) del crecimiento anual de emisión de $N_2O$ (2001-2010) |
|------------|-------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| China      | -2.4                                                                    | -1.5                                                                 | 3.2                                                                  |
| Rusia      | 7.6                                                                     | 5.2                                                                  | 0.9                                                                  |
| India      | 1.6                                                                     | 1.8                                                                  | 4.6                                                                  |
| Indonesia  | 1.6                                                                     | 2.1                                                                  | 4.3                                                                  |
| Pakistán   | 3.5                                                                     | 1.1                                                                  | 1.3                                                                  |
| Bangladesh | 4.5                                                                     | 0.7                                                                  | 1.1                                                                  |
| Uzbekistán | 2.0                                                                     | 1.0                                                                  | 1.3                                                                  |
| Nepal      | 12.5                                                                    | 14.1                                                                 | -0.9                                                                 |
| Myanmar    | 32.1                                                                    | 22.3                                                                 | -3.1                                                                 |
| Tayikistan | 43.4                                                                    | 159.0                                                                | -5.0                                                                 |
| Azerbaijan | 15.3                                                                    | 84.3                                                                 | 3.0                                                                  |
| Brasil     | 7.2                                                                     | 5.5                                                                  | 8.9                                                                  |
| Argentina  | 10.4                                                                    | 6.3                                                                  | 5.5                                                                  |
| Uruguay    | 9.3                                                                     | 4.5                                                                  | 18.3                                                                 |
| Ecuador    | 7.8                                                                     | 1.7                                                                  | -3.0                                                                 |
| Turquía    | 2.5                                                                     | 6.3                                                                  | 2.6                                                                  |
| Ucrania    | 5.2                                                                     | 9.1                                                                  | 10.4                                                                 |
| Canadá     | 1.0                                                                     | 2.4                                                                  | 3.3                                                                  |

Fuente: elaboración propia con base en la información reportada por IFASTAT *Plant Nutrition Query* [25] and FAOSTAT [20].

La Figura 2 proyecta la evolución a través del tiempo evaluado de las emisiones de óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) por región, donde se observa un incremento significativo de Asia respecto a las demás regiones del mundo. Mientras que América y Europa mantienen niveles de emisión secundarios y relativamente estables con ligeras fluctuaciones al alza y a la baja respectivamente, Asia presenta una pendiente geométrica ascendente que casi duplica su valor inicial en dos décadas. Por otro lado, África y Oceanía registran las menores contribuciones con variaciones prácticamente imperceptibles en comparación con las potencias industriales. Este comportamiento evidencia una heterogeneidad notoria en las fuentes de emisión regionales, factiblemente vinculadas a la intensificación agrícola y los procesos de industrialización diferenciados. A partir del año 2011, el comportamiento de Asia parece estabilizarse en torno a las 1400 mil toneladas, aunque mantiene un repunte final hacia el año 2020.

**Figura 2.** Emisiones de  $\text{N}_2\text{O}$  por region a partir de fertilizantes sintéticos.

**Figure 2.**  $\text{N}_2\text{O}$  emissions by region from synthetic fertilizers.



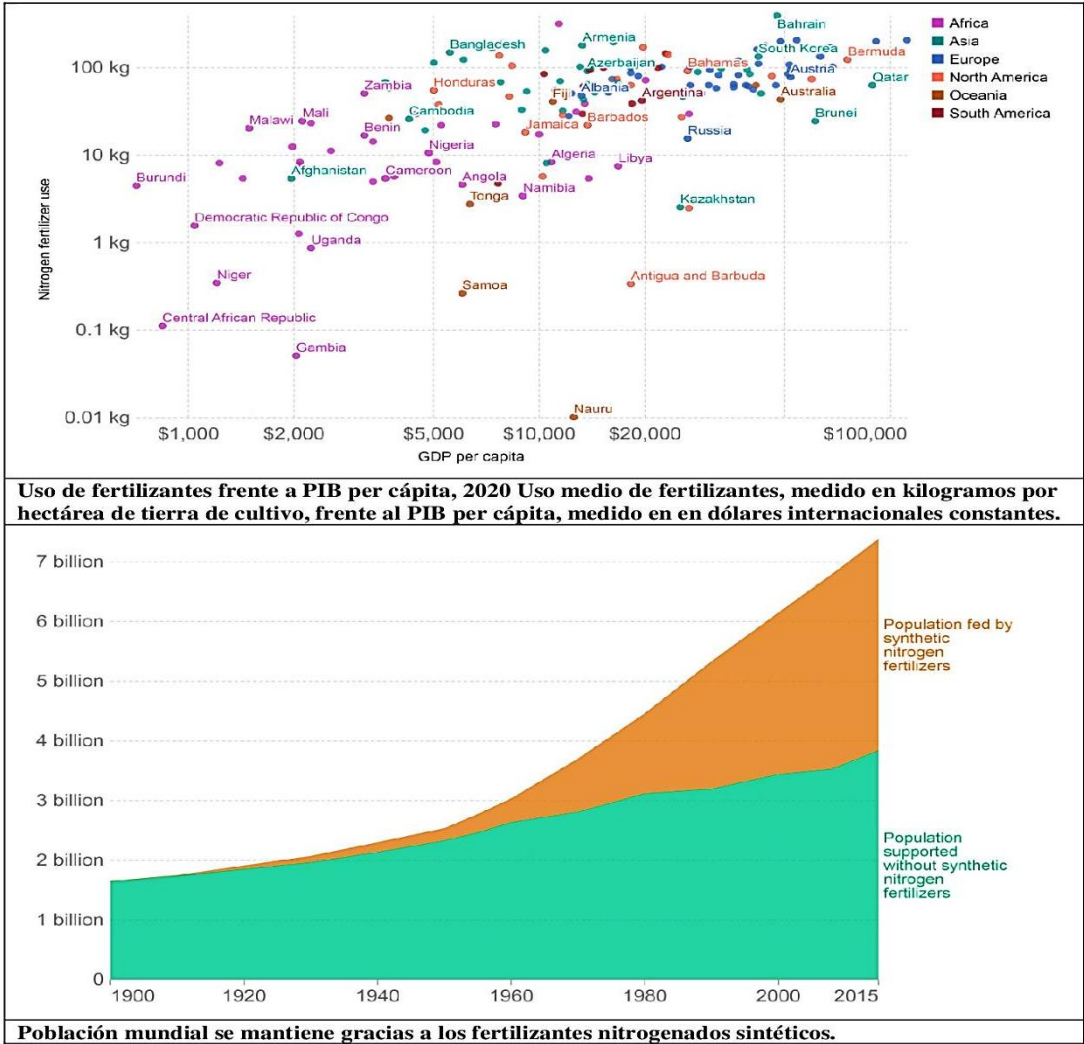
Fuente: elaboración propia con base en la información reportada por FAOSTAT [20].

El análisis bidimensional de la información muestra una correlación directa entre el desarrollo económico y la dependencia agroquímica, donde el uso de fertilizantes nitrogenados por hectárea tiende a incrementarse proporcionalmente con el PIB per cápita de las naciones. En la Figura 3, se aprecia que los países con mayores ingresos, principalmente en Asia y Europa, presentan las cantidades de aplicación más altas, superando frecuentemente los 100 kg/ha. En contraste, las regiones de África muestran una variabilidad marcada, con países de bajo PIB que mantienen un uso mínimo de nitrógeno sintético, evidenciando una disparidad tecnológica y económica en el acceso a insumos. La gráfica de áreas muestra que la seguridad alimentaria global ha experimentado un cambio desde 1900, cuando la población dependía casi exclusivamente de procesos naturales. A partir de la década de 1950, se aprecia una divergencia: mientras la población sostenida sin fertilizantes sintéticos se estabiliza cerca de los 4 mil millones, la población total se incrementó debido al uso de químicos en sus cultivos. Para el año 2015,

cerca de la mitad de la humanidad depende directamente de los fertilizantes para su subsistencia. Lo anterior indica que el crecimiento demográfico es un fenómeno asociado a la intensificación del ciclo del nitrógeno de acuerdo a lo proyectado.

**Figura 3.** Impacto de los fertilizantes en relación a la economía y tamaño de la población.

**Figure 3.** Impact of fertilizers in relation to the economy and population size.

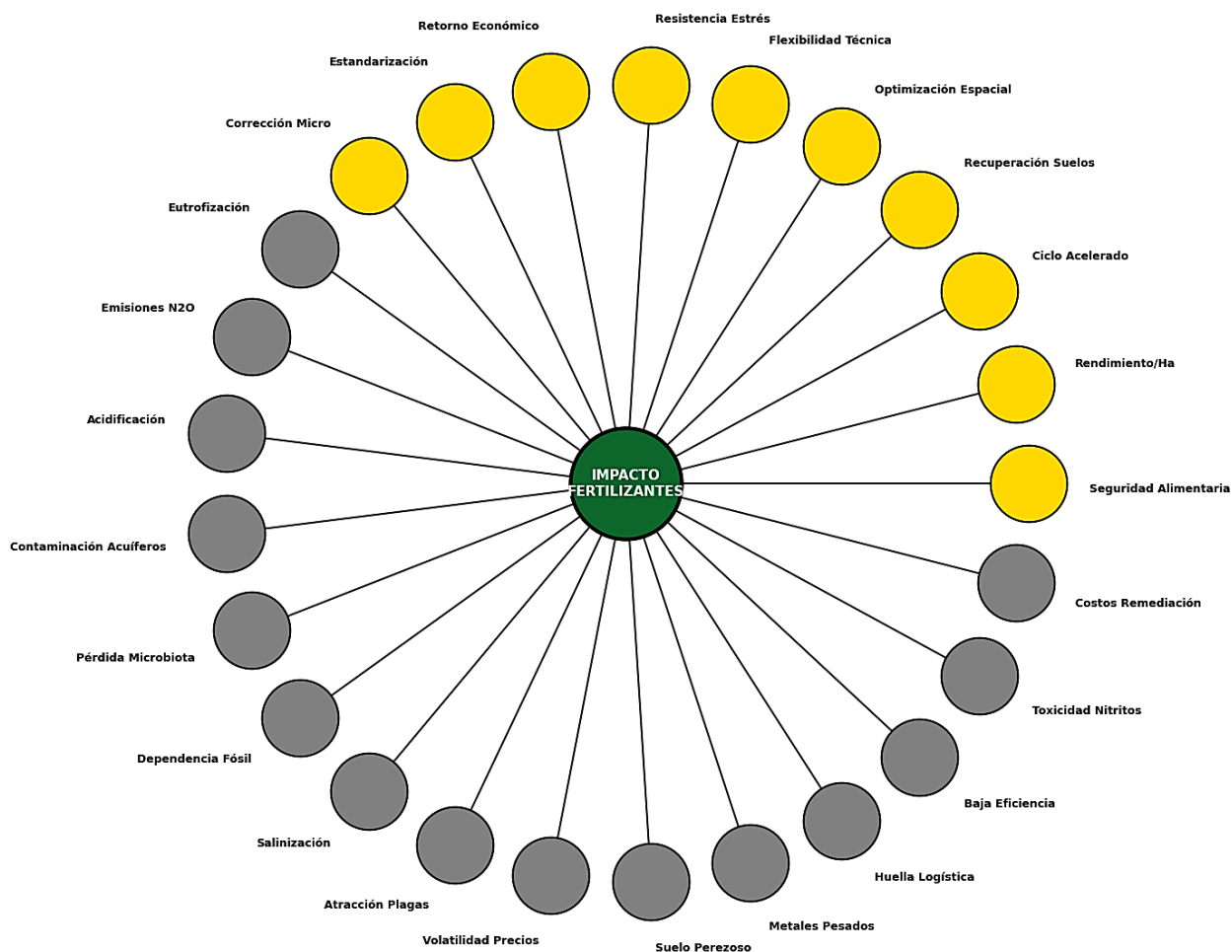


Fuente: elaboración propia con base en la información reportada por *Our World in Data* [22], Banco Mundial [24], *United States Department of Agriculture* (USDA) [23].

**Figura 4.** Ventajas y desventajas del uso de fertilizantes.

**Figure 4.** Advantages and disadvantages of fertilizer use.

La Figura 4 proyecta las ventajas del uso de fertilizantes en relación con la garantía de una seguridad alimentaria para la humanidad, al permitir rendimientos por hectárea que superan el límite de subsistencia y facilitar un ciclo vegetativo acelerado mediante el aporte de macronutrientes. La tecnificación en el empleo de micronutrientes permite que cultivos de alta demanda fructifiquen en suelos originalmente pobres, transformando tierras marginales en sistemas de alta productividad con un efecto económico en favor del productor. Por otro lado, las desventajas representadas en gris están asociadas a factores de contaminación ambiental, pérdida de microbiota, salinización del suelo, atracción de plagas y toxicidad, entre otros factores críticos.



Fuente: elaboración propia con base en la información reportada en las referencias citadas.

Al efectuar el análisis estadístico multivariado mediante las pruebas de Wilks' Lambda, Pillai's Trace, Hotelling-Lawley y Roy's Greatest Root con base en el conjunto de variables evaluadas, se detecta diferencia altamente significativa. Los resultados demuestran que existe divergencia en el uso y comportamiento de los fertilizantes nitrogenados entre las diferentes regiones analizadas. El análisis canónico, establece una jerarquía en el impacto productivo y ambiental, donde Asia se posiciona como el líder en lo referente a volumen e intensidad de uso de fertilizantes. Le siguen, en orden Sudamérica, Europa y Norteamérica, lo que refleja patrones diferenciados de tecnificación y consumo. Por su parte, Oceanía y África se ubican en niveles inferiores. El análisis **MANOVA** permite inferir estadísticamente

que la distribución global de fertilizantes está fuertemente estratificada según el desarrollo agrícola y económico de cada región (Tabla 2).

**Tabla 2.** Análisis multivariado de la varianza (MANOVA)

**Table 2.** Multivariate analysis of variance (MANOVA)

| Prueba                 |   |            |   | Valor p |   |
|------------------------|---|------------|---|---------|---|
| Wilks' Lambda          |   |            |   | <0.0001 |   |
| Pillai's Trace         |   |            |   | <0.0001 |   |
| Hotelling-Lawley Trace |   |            |   | <0.0001 |   |
| Roy's Greatest Root    |   |            |   | <0.0001 |   |
| Análisis canónico      |   |            |   |         |   |
| Asia                   | a | Sudamérica | b | Europa  | c |
| Norteamérica           | d | Oceanía    | e | África  | f |

Fuente: elaboración propia de la investigación con base en la información recopilada de las bases citadas. Letras distintas indican diferencia estadística.

En las Tablas 3 y 4, se describe el uso de fertilizantes por región y países. China, Alemania, India, Uzbekistán, Reino Unido son las naciones que emplean la mayor cantidad de fertilizantes sintéticos a nivel mundial. El análisis longitudinal asociado al consumo de fertilizantes por décadas revela un uso significativo que es empleado en labores agrícolas a nivel global, destacando el incremento de carácter exponencial de Asia y Sudamérica frente al declive de Europa Occidental. Asia presenta el aumento más notorio, multiplicando sus niveles de 8.4 Kg/ha en la década de 1960 hasta alcanzar los 187.4 Kg/ha en el periodo 2010-2020, consolidándose como el mayor consumidor mundial. Sudamérica presenta un comportamiento similar, con un incremento marcado a partir del año 2000 que la lleva a superar los 200 Kg/ha en la última década, duplicando su consumo previo en apenas diez años. En contraste, Europa Occidental describe un comportamiento atípico; al alcanzar un punto máximo de 343.4 Kg/ha en los años 80, iniciando un declive en el tiempo hasta los 165.3 Kg/ha actuales. Europa Oriental, evidencia una caída en el consumo de 126.2 Kg/ha a 28.9 Kg/ha de la década del 80 al 90. Norteamérica y Oceanía mantienen tendencias de crecimiento moderado y estabilidad relativa. África, aunque muestra el consumo más bajo respecto a las demás zonas geográficas, ha incrementado su uso de manera constante, pasando de 4.3 Kg/ha a 26.4 Kg/ha en las últimas seis décadas. El promedio mundial, que se sitúa en 128.9 Kg/ha para el periodo final evaluado, está impulsado de manera principal por la intensificación agroindustrial en las naciones subdesarrolladas, mientras las potencias tienden a reducir su dependencia química.

**Tabla 3.** Uso de fertilizantes expresado en kilogramos\*ha<sup>-1</sup> por regiones en el tiempo

**Table 3.** Fertilizer use expressed in kilograms\*ha<sup>-1</sup> by region over time

| Región            | Décadas   |           |           |           |           |           |
|-------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                   | 1960-1969 | 1970-1979 | 1980-1989 | 1990-1999 | 2000-2009 | 2010-2020 |
| África            | 4.3       | 8.8       | 18.9      | 16.0      | 18.0      | 26.4      |
| Asia              | 8.4       | 25.7      | 78.1      | 120.9     | 156.9     | 187.4     |
| Norteamérica      | 35.9      | 69.9      | 90.1      | 99.1      | 105.7     | 125.3     |
| Europa Oriental   | 17.1      | 59.2      | 126.2     | 28.9      | 32.1      | 54.8      |
| Europa Occidental | 179.6     | 311.8     | 343.4     | 252.8     | 196.1     | 165.3     |
| Sudamérica        | 7.7       | 19.4      | 39.8      | 60.5      | 100.4     | 203.7     |
| Oceanía           | 43.9      | 50.4      | 53.4      | 104.7     | 81.5      | 82.1      |

|       |      |      |      |      |       |       |
|-------|------|------|------|------|-------|-------|
| Mundo | 22.8 | 49.4 | 88.3 | 86.9 | 102.8 | 128.9 |
|-------|------|------|------|------|-------|-------|

Fuente: elaboración propia con base en la información reportada por la FAO [20].

**Tabla 4.** Naciones que más usan fertilizantes sintéticos

**Table 4.** Nations that use the most synthetic fertilizers

| País            | kilogramos por hectárea |            |          |                      |
|-----------------|-------------------------|------------|----------|----------------------|
|                 | Nitrogenados            | Fosfatados | Potásico | Todos los nutrientes |
| China           | 190.8                   | 72.6       | 73.2     | 336.6                |
| Alemania        | 106.7                   | 16.2       | 37.6     | 160.5                |
| India           | 120.9                   | 53.2       | 18.7     | 192.8                |
| Uzbekistán      | 162.5                   | 50.9       | 17.2     | 230.6                |
| Reino Unido     | 160.5                   | 28.9       | 42.0     | 231.4                |
| Bélgica         | 197.0                   | 21.6       | 68.9     | 287.5                |
| Países Bajos    | 205.7                   | 13.1       | 49.1     | 267.9                |
| Francia         | 109.5                   | 23.9       | 26.5     | 160.0                |
| Chile           | 143.8                   | 86.5       | 58.9     | 289.3                |
| Omán            | 95.2                    | 29.7       | 103.1    | 227.9                |
| Egipto          | 313.6                   | 56.1       | 31.5     | 401.1                |
| Turquía         | 88.7                    | 32.9       | 5.0      | 126.6                |
| Turkmenistán    | 144.0                   | 17.9       | 0.6      | 162.5                |
| Azerbaiyán      | 90.1                    | 0.2        | 3.2      | 93.4                 |
| Emiratos Árabes | 167.7                   | 46.2       | 136.2    | 350.1                |
| Bulgaria        | 99.9                    | 21.7       | 11.8     | 133.4                |
| Croacia         | 102.0                   | 36.4       | 44.8     | 183.2                |
| Hungría         | 106.7                   | 26.9       | 23.3     | 156.9                |
| Japón           | 84.5                    | 77.3       | 61.7     | 223.5                |
| Brasil          | 93.0                    | 113.9      | 113.7    | 320.6                |

Fuente: elaboración propia con base en la información reportada por: *Our World in Data* [22], Banco Mundial [24], *United States Department of Agriculture* (USDA [23]).

El análisis de correlación permitió detectar una asociación en los patrones de uso de fertilizantes entre las diferentes regiones del mundo, destacando Asia y Sudamérica las cuales presentan una relación altamente significativa ( $r = 0.999$ ,  $p < 0.001$ ), lo que sugiere que ambas regiones responden a dinámicas de intensificación agroindustrial similares. Asimismo, Norteamérica muestra relaciones significativas con Asia y Sudamérica. En contraste, las regiones de Europa presentan asociaciones estadísticamente inversas y no significativas, particularmente Europa Occidental, presenta un coeficiente de  $-0.374$  con Sudamérica indicando una divergencia en sus políticas de fertilización. África, a pesar de sus niveles de uso más bajos, mantiene una relación positiva y significativa con Asia y América. Oceanía presenta correlaciones superiores a  $0.82$  respecto a las principales regiones productoras de cultivos. La información permite inferir que el sistema alimentario global opera bajo una estructura, donde la mayoría de las zonas geográficas, salvo Europa Occidental, avanzan de forma lineal y proporcional en su dependencia de insumos químicos.

**Tabla 5.** Análisis de correlación asociado al uso de fertilizantes

**Table 5.** Correlation analysis associated with the use of fertilizers

|    | X1  | X2     | X3     | X4    | X5     | X6     | X7     |
|----|-----|--------|--------|-------|--------|--------|--------|
| X1 | 1.0 | 0.828* | 0.828* | 0.542 | -0.085 | 0.825* | 0.600  |
| X2 |     | 1.0    | 0.999* | 0.142 | -0.371 | 0.999* | 0.828* |
| X3 |     |        | 1.0    | 0.143 | -0.374 | 0.998* | 0.827* |
| X4 |     |        |        | 1.0   | 0.601  | 0.142  | -0.021 |
| X5 |     |        |        |       | 1.0    | -0.374 | -0.142 |
| X6 |     |        |        |       |        | 1.0    | 0.828* |
| X7 |     |        |        |       |        |        | 1.0    |

Fuente: elaboración propia de la investigación con base en la información recopilada de las bases citadas. Letras distintas indican diferencia estadística. X1=África, X2= Asia, X3= Norteamérica, X4= Europa Oriental, X5= Europa Occidental, X6= Sudamérica, X7= Oceanía. \* indica que la relación altamente significativa y directamente proporcional.

#### 4. DISCUSIÓN

El incremento permanente de la población mundial implica una mayor demanda de alimentos, que está directamente relacionada con la necesidad de asegurar más altos índices de producción agrícola. Por lo que la agricultura figura como uno de los sectores de la economía más importantes, por su representatividad en el bienestar de las personas, como en el aporte en la producción de productos agrícolas en el equilibrio del PIB mundial, indicando qué tanto cada país tiene la capacidad de abastecimiento alimentario proveído por dicho sector por su participación en el indicador económico, pero con predominio a su vez, de indicadores de exceso de aplicaciones, afectando la eficiencia y maximización en la producción de alimentos, a altos costos de sostenibilidad ambiental y social. Es exactamente así, como los países BRICS (entre ellos China, Brasil e India) constituidos entre las principales economías en crecimiento del PIB y participación del sector, están a su vez, entre los países a nivel mundial que más utilizan fertilizantes y enfrentan graves problemas de contaminación y deterioro de recursos empleados, por lo que han reconocido la importancia de incursionar en modelos de agricultura sostenible que apunte a la reconversión tecnológica en el tema y que empiece a verse poco a poco reflejado en los cambios de indicadores como es por ejemplo la reducción de emisiones de  $N_2O$  a excepción de Rusia, entre la última década 2011 a 2020 y la anterior 2001 a 2010.

Es una realidad que el incremento de estrategias encaminadas a ampliar la capacidad productiva agrícola de la mano con el aumento en el uso de insumos químicos como los fertilizantes, refleja consecuencias negativas en el medio ambiente y la salud humana, a través de la emisión de gases efecto invernadero, caso  $N_2O$ , la eutrofización de fuentes hídricas, la acidificación del suelo y la disminución de la biodiversidad por el uso de más áreas dedicadas [26]. El uso por el contrario de tecnologías verdes en fertilizantes, que buscan maximizar la eficiencia nutricional, en países que están incursionando en ello como los BRICS, tiene el potencial de reducir su huella ecológica, disminuir la degradación de suelos, promover el crecimiento sostenible y mitigar los efectos del cambio climático [27].

Asia se destaca principalmente por exportar a gran escala tanto azúcar de caña en bruto como azúcar refinada de caña, así mismo trigo, maíz, yuca y su almidón, que hacen parte de los cultivos agrícolas que más se expanden en uso de áreas nuevas e igual sucede en América con los cultivos de soja, maíz, trigo, azúcar de caña y bananos, siendo todos estos productos, responsables de la gran emisión de gases efecto invernadero por el alto uso de fertilizantes y que no van destinados exclusivamente a la alimentación humana. La dedicación de dichas áreas de frontera agrícola en Asia, se ve reflejado principalmente en el

crecimiento anual de forma significativa en los productos de exportación, en la última década, siendo de un 9.1% para azúcar refinada, 10,4% en almidón de yuca y 4.0% en cebollas y chalotes secos. Mientras en América crece en los productos de exportación de soja en un 6,9%, para maíz en un 7.8% y bananos en un 2.9%.

Sin embargo, los intentos fallidos por expandir más tierras destinadas a la producción agrícola en estos países, ha implicado que se implementen estrategias diversas para sostenerlos, fundamentándose en tecnologías con repercusiones negativas, tales como fertilización por irrigación a gran escala y uso de pesticidas desarrollados para organismos genéticamente modificados [28]. Teniendo en cuenta, además, que gran proporción de dicha producción, es alimento para animales y otra para alimentos altamente procesados que pueden afectar la salud.

### **Algunos aspectos negativos a cambiar del uso de los fertilizantes**

Si bien es cierto que durante las últimas seis décadas, una tras otra, años 60s al 2020, se denota un uso significativamente creciente de los fertilizantes, como hecho clave para asegurar el incremento de la producción agrícola para atender demandas de bienes y servicios alimentarios de la población, también lo es que, de acuerdo con estudios realizados recientemente, hay evidencia de la ineficiencia en el uso de estos insumos sintéticos, tanto así que los incrementos de producción de alimentos por parte de diversos países se han estancado significativamente, causando por el contrario, una generación excesiva de residuos de agroquímicos que ingresan a los ecosistemas circundantes además de los agroecosistemas en producción, afectando los servicios ecosistémicos.

Es prioritario entonces, el manejo eficaz de los fertilizantes nitrogenados y demás, con un enfoque sostenible integral que satisfaga la creciente demanda de productos y servicios agrícolas, pero conservando cuidadosamente los límites de la frontera agrícola sin menoscabo de la sostenibilidad de los recursos y servicios ecosistémicos. Sin embargo, fomentar la adopción generalizada de estas recomendaciones sigue siendo hoy en día, un desafío crucial. Debe trazarse una visión y planificación de estrategias de optimización de la tasa de uso de los fertilizantes hacia un mayor énfasis en la conservación del medio ambiente, el suelo y la innovación tecnológica [29], esta última bajo el enfoque ampliado de la sostenibilidad, es decir, profundizando en cada contexto particular.

Indicadores químicos, físicos y biológicos han demostrado el descenso en la calidad y capacidad productiva de los suelos, consecuencia directa del uso excesivo e inadecuado de fertilizantes minerales, especialmente por nitrogenados y fosfatados que se desplazan por escorrentía e infiltración [30]. Esta realidad deja claro que utilizar tecnologías y sistemas de fertilización inadecuados trae consecuencias negativas para la salud del suelo y las actividades ecosistémicas que tienen relación con el manejo de la tierra, como la alteración del pH, la posibilidad del ataque de plagas, la acidificación y el encostramiento del suelo, con reducción del carbono orgánico como de los organismos útiles en el proceso productivo, provocando no solo la emisión de gases efecto invernadero, sino también afectando el crecimiento y el rendimiento de las plantas [30-33].

### **Contraste con respecto a otros estudios sobre fertilizantes a nivel mundial**

El estudio adelantado por Cameron et. al [34] recopila información entre los años 2017 al 2018 con base en la encuesta de la IFA, donde se evaluaron 76 países que representan más del 90% del consumo mundial de fertilizantes. China se destaca como un gran consumidor, siendo responsable del 32% del uso mundial de fertilizantes. Países como Paraguay, Senegal y Chipre muestran las mayores variaciones en sus estimaciones, lo que subraya la necesidad de mejorar los mecanismos de reporte a nivel local. En la presente investigación China es una de las naciones que emplean más fertilizantes, lo que coincide con el estudio anterior.

El informe presentado por la IFA en el año 2025 presenta un análisis relacionado con la recuperación del mercado global de nutrientes tras la variabilidad detectada en los años previos. La dinámica mundial de los nutrientes que son fundamentales en la agricultura a nivel orbital muestra un periodo de estabilización y crecimiento sostenido, proyectando que el uso total de fertilizantes alcanzará los 224 millones de toneladas de nutrientes para el año 2029. Esta inferencia refleja una recuperación tras los mínimos registrados en el año 2022, consolidando la seguridad alimentaria como el principal motor de la demanda [35]. Los resultados coinciden en lo referente a la evaluación en el pasado en relación a la volatilidad del mercado.

La optimización del uso del nitrógeno en los agroecosistemas globales representa un desafío crítico para la humanidad de alcanzar una seguridad alimentaria sostenible y mitigar impactos ambientales. El estudio adelantado por You et al., en el año 2025 [36], analiza el potencial de mejora de la eficiencia de recuperación de nitrógeno por medio de la implementación de prácticas de gestión integrales en suelos y cultivos. La investigación rectifica estimaciones previas al incorporar tasas reales de adopción de tecnologías avanzadas, evitando así la sobreestimación del potencial de mejora global. Los resultados demuestran que, a pesar de los avances actuales, existe un margen significativo para elevar la eficiencia mediante la aplicación técnica y oportuna de nutrientes. Se destaca que la transición hacia una agricultura de precisión es fundamental para reducir las pérdidas reactivas de nitrógeno sin comprometer el rendimiento [36]. El presente estudio muestra que en Latinoamérica el uso de fertilizantes nitrogenados mantiene un crecimiento sostenido y vigoroso en Brasil, Argentina y Uruguay, con tasas de variación en el uso de fertilizantes que oscilan entre el 7% y el 10%, reflejando una intensificación de sus modelos agroexportadores. Azerbaiyán, el aumento del 15.3% en el uso de fertilizantes incidió en una variación del 84.3% en las emisiones de  $N_2O$  en la última década.

## 5. CONCLUSIONES

A través del análisis de las bases de datos citadas en el presente artículo, se estableció que el uso excesivo de nitrógeno y fósforo por hectárea es más crítico en países como China y Arabia Saudita, donde la brecha entre los aportes de nutrientes y la cantidad cosechada genera excedentes que no incrementan el rendimiento productivo, pero sí comprometen la estabilidad de los ciclos biogeoquímicos y la calidad de los cuerpos de agua por procesos de escorrentía.

La investigación permitió establecer que el uso de fertilizantes por hectárea ha experimentado un ascenso constante a nivel mundial, pasando de un promedio de 22.8 kg/ha en la década de los 60 a 128.9 kg/ha en el periodo 2010-2020. Las naciones con mayores consumos de nutrientes sintéticos, son quienes a menudo aplican el componente en exceso sin lograr un incremento proporcional en el rendimiento de sus cosechas. El estudio de tipo longitudinal en las últimas seis décadas revela una correlación directa entre el incremento de la producción de fertilizantes nitrogenados y el aumento de las emisiones de óxido nitroso ( $N_2O$ ), destacando que naciones con alto crecimiento productivo como Tayikistán (43.4%) y Nepal (12.5%) presentan variaciones extremas en sus emisiones, lo que incide en la ineficiencia en la aplicación de estos insumos y su impacto en el calentamiento global.

El uso de fertilizantes sintéticos en cultivos, en especial los nitrogenados, sin un debido control y de manera ineficiente por no tener en cuenta tanto las propiedades de dicho insumo más las correspondientes al equilibrio dinámico de los suelos, afecta definitivamente los ciclos biogeoquímicos, con la producción de gases efecto invernadero, en este caso en especial, óxido nitroso, que es un gas con gran potencial de calentamiento, el cual está creciendo en emisiones continuas a la atmósfera, con algunas excepciones, especialmente en los países asiáticos y sudamericanos, que en general son los que más aplican este tipo de fertilizantes y en especial con gran dedicación a productos de exportación para alimentación animal y para la industria del procesamiento. Es fundamental que quienes se dedican a la agricultura, con el fin de asegurar la mejor nutrición para las plantas a través de la incorporación de fertilizantes, sin afectar los

servicios ecosistémicos y garantizando la eficiencia productiva sin sobrecostos y desperdicios de uso indebido, comprendan y conozcan la gran variedad de ciclos de nutrientes y el ritmo de liberación y entrega de cada uno de ellos, a través de la dinámica de factores complejos y el contenido y manejo de la materia orgánica. Es por ello que, la generación de tecnologías de carácter integrado y combinado entre factores de fabricación sintética de fertilizantes de lenta liberación y otras tecnologías más sostenibles como las orgánicas, junto con estudios de contexto particular y en profundidad de factores microbiológicos, biológicos y el buen manejo general de prácticas de manejo del suelo, contribuirá a la implementación de medidas prácticas de mitigación de gases de efecto invernadero y a frenar la ampliación de la frontera agrícola a través del uso indiscriminado de nuevas tierras para la producción del monocultivo de exportación y concentrarse en la producción de alimentos para la humanidad.

### Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe ningún conflicto de intereses.

### Referencias Bibliográficas

- [1] F. Rico-Calvano and H. M. Rico-Fontalvo, “El uso del suelo, ¿Un problema de capacidad productiva y de políticas públicas?,” *Rev. Logos, Cienc. Tecnol.*, vol. 5, no. 2, pp. 213–231, 2014. [Online]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6484747>
- [2] M. G. Kibblewhite, K. Ritz, and M. J. Swift, “Soil health in agricultural systems,” *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B Biol. Sci.*, vol. 363, no. 1492, pp. 685–701, 2008, doi: 10.1098/rstb.2007.2178.
- [3] C. I. Ludemann, A. Gruere, P. Heffer, and A. Dobermann, “Global data on fertilizer use by crop and by country”, *Sci. Data.*, vol. 9, p. 501, 2022, doi: 10.1038/s41597-022-01592-z.
- [4] J. P. Aryal, T. B. Sapkota, T. J. Krupnik, D. B. Rahut, M. L. Jat, and C. M. Stirling, “Factors affecting farmers’ use of organic and inorganic fertilizers in South Asia,” *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 28, pp. 51480–51496, 2021, doi: 10.1007/s11356-021-13975-7.
- [5] T. B. Sapkota, J. P. Aryal, A. Khatri-Chhetri, P. B. Shirsath, P. Arumugam, and C. M. Stirling, “Identifying high-yield low-emission pathways for the cereal production in South Asia,” *Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Change*, vol. 23, pp. 621–641, 2018, doi: 10.1007/s11027-017-9752-1.
- [6] P. Krasilnikov, M. A. Taboada, and A. Amanullah, “Fertilizer use, soil health and agricultural sustainability,” *Agriculture*, vol. 12, no. 4, p. 462, 2022, doi: 10.3390/agriculture12040462.
- [7] S. Irawan and E. Antriandarti, “Fertilizer application, climate change and rice production in rural Java,” *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, vol. 755, p. 012086, 2021, doi: 10.1088/1755-1315/755/1/012086.
- [8] R. Rathore, B. R. Bakshi, H. Kodamana, and M. Ramteke, “Multi-objective optimization of crop land allocation for sustainability within the food-energy-water-land-fertilizer (FEWLF) Nexus,” *Comput. Chem. Eng.*, vol. 201, pp. 109–207, 2025, doi: 10.1016/j.compchemeng.2025.109207.
- [9] J. Liu, “Importance and impact of fertilizer in agriculture science,” *J. Agric. Sci. Food Res.*, vol. 12, no. 291, pp. 1–3, 2021, doi: 10.35248/2593-9173.21.12.291.
- [10] B. Hoyeton and L. Jingdong, “Do fertilizers and cropland influence the agricultural production value in the same way? Evidence using the autoregressive distributed lags approach of cointegration,” *J. Agric. Biotechnol. Sustain. Dev.*, vol. 10, no. 4, pp. 58–66, 2018, doi: 10.5897/JABSD2017.0303.

- [11] L. Babcock-Jackson, T. Konovalova, J. P. Krogman, R. Bird, and L. L. Díaz, “Sustainable fertilizers: publication landscape on wastes as nutrient sources, wastewater treatment processes for nutrient recovery, biorefineries, and green ammonia synthesis,” *J. Agric. Food Chem.*, vol. 71, no. 22, pp. 8265–8296, 2023, doi: 10.1021/acs.jafc.3c00454.
- [12] Y. Yang, L. Liu, P. Liu, J. Ding, H. Xu, and S. Liu, “Improved global agricultural crop- and animal-specific ammonia emissions during 1961–2018,” *Agric. Ecosyst. Environ.*, vol. 344, p. 108289, 2023, doi: 10.1016/j.agee.2022.108289.
- [13] F. Romero-Perdomo, P. J. Criollo-Campos, A. J. Rodríguez, M. C. Rusinque, and R. R. Bonilla-Buitrago, “Efecto de fertilizantes y herbicidas sobre el crecimiento in vitro de *Azospirillum brasilense* C16,” *Rev. Soc. Venezolana Microbiol.*, vol. 35, no. 2, pp. 117–120, 2015. [Online]. Available: [http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1315-25562015000200010](http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1315-25562015000200010)
- [14] B. Ma, M. S. Karimi, K. S. Mohammed, I. Shahzadi, and J. Dai, “Nexus between climate change, agricultural output, fertilizer use, agriculture soil emissions: Novel implications in the context of environmental management,” *J. Clean. Prod.*, vol. 450, p. 141801, 2024, doi: 10.1016/j.jclepro.2024.141801.
- [15] J. Shavkat, A. Bakhrom, and M. Mukambar, “Effect of organic fertilizers on agrochemical properties of soil and growth, development and yield of cotton,” *ERSME E3S Web Conf.*, vol. 376, p. 02012, 2023, doi: 10.1051/e3sconf/202337602012.
- [16] S. Berezyuk, N. Pryshliak, and I. Zubar, “Ecological and economic problems of fertilizers application in crop production,” *Bulg. J. Agric. Sci.*, vol. 27, no. 1, pp. 29–37, 2021. [Online]. Available: <http://socrates.vsau.edu.ua/repository/getfile.php/27961.pdf>
- [17] S. V. Vicente-Solano, M. E. Calle-Arancibia, “Fertilizantes en la producción agrícola: un análisis de la percepción de uso”. *Apuntes del Cenes.*, vol.43, p.78, 2025, doi:10.19053/uptc.01203053.v43.n78.2024.17532.
- [18] V. Ghimirey, J. Chaurasia, R. Dhungana, B. Poude, “Organic fertilizers and their efficacy on soil characteristics, growth and yield of cauliflower (*Brassica oleraceae* var. botrytis) in sandy loam soil of Nepal”. *Front. Soil Sci.* vol.5, no.1556283, 2025, doi: 10.3389/fsoil.2025.1556283.
- [19] L. Estepa, L. Hidalgo, O. Nekhay, “Es económicamente viable la agricultura orgánica y agroecológica? Un estudio de caso en Paraguay”. *Revista de fomento social*, vol.308, 235-265, 2024, doi:10.32418/rfs.2024.308.5320.
- [20] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). FAOSTAT: “Fertilizantes por nutriente”, 2025. Recuperado de: <https://www.fao.org/faostat/es/#data/RFN>
- [21] Naciones Unidas (ONU). “Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible: Hacia un plan de rescate para las personas y el planeta”. Nueva York, EE. UU. 2023.
- [22] Our World in Data. “Fertilizers: Production and consumption of nitrogen, phosphorus, and potassium fertilizers”. 2024. Recuperado de: <https://ourworldindata.org/fertilizers>
- [23] United States Department of Agriculture (USDA). “Fertilizer Use and Price: Economic Research Service Report”. Washington D.C., EE. UU. 2023.

- [24] Banco Mundial. “Precios de los productos básicos (Commodity Markets Outlook): El impacto de los fertilizantes en la inflación alimentaria”. Washington D.C., EE. UU. 2023.
- [25] International Fertilizer Association (IFA). IFASTAT: “Plant Nutrition Query Tool”. 2026. Recuperado de: <https://www.ifastat.org/databases/plant-nutrition>
- [26] M. E. Beltrán-Pineda and A. A. Bernal-Figueroa, “Biofertilizantes: alternativa biotecnológica para los agroecosistemas,” *Mutis*, vol. 12, no. 1, 2022, doi: 10.21789/22561498.1771.
- [27] Q. Feng, M. Usman, N. Saqib, and U. Mentel, “Modelling the contribution of green technologies, renewable energy, economic complexity, and human capital in environmental sustainability: Evidence from BRICS countries,” *Gondwana Res.*, vol. 132, pp. 168–181, 2024, doi: 10.1016/j.gr.2024.04.010.
- [28] R. Finger, S. M. Swinton, N. El Benni, and A. Walter, “Precision farming at the nexus of agricultural production and the environment,” *Annu. Rev. Resour. Econ.*, vol. 11, pp. 313–335, 2019, doi: 10.1146/annurev-resource-100518-093929.
- [29] S. Cai, X. Zhao, and X. Yan, “Towards precise nitrogen fertilizer management for sustainable agriculture,” *Earth Crit. Zone*, vol. 2, 2025, doi: 10.1016/j.ecz.2025.100026.
- [30] H. N. Paharvi, L. Rafiya, S. Rashid, B. Nisar, and A. N. Kamili, “Chemical fertilizers and their impact on soil health,” in *Microbiota and Biofertilizers, Cham, Switzerland: Springer*, pp. 1–20, 2021.
- [31] E. Ozlu and S. Kumar, “Response of soil organic carbon, pH, electrical conductivity, and water stable aggregates to long-term annual manure and inorganic fertilizer,” *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 82, no. 5, pp. 1243–1251, 2018, doi: 10.2136/sssaj2018.02.0082.
- [32] N. Frattini, A. Pulido-Carrasquero, L. Pronsato, L. Milanesi, A. Vasconsuelo, et al., “Effects of common fertilizers on the soil ecosystem,” *Bull. Natl. Res. Cent.*, vol. 47, no. 78, 2023, doi: 10.1186/s42269-023-01051-8.
- [33] M. Skorupka and A. Nosalewicz, “Ammonia volatilization from fertilizer urea: A new challenge for agriculture and industry in view of growing global demand for food and energy crops,” *Agriculture*, vol. 11, no. 9, p. 822, 2021, doi: 10.3390/agriculture11090822.
- [34] C. I. Ludemann, A. Gruere, P. Heffer, P. et al. “Datos globales sobre el uso de fertilizantes por cultivo y por país”. *Sci Data*, vol. 9, no. 501, 2022, doi:10.1038/s41597-022-01592-z
- [35] International Fertilizer Association [IFA]. “Public Summary: Medium-Term Fertilizer Outlook 2025–2029”. París, Francia. 2025. Recuperado de <https://www.fertilizer.org/public-summary-medium-term-outlook-2025-2029>
- [36] L. You, G. H. Ros, Y. Chen, et al. “Addendum: Global mean nitrogen recovery efficiency in croplands can be enhanced by optimal nutrient, crop and soil management practices”. *Nat Commun*, vol. 16, 7399, 2025, <https://doi.org/10.1038/s41467-025-62095-0>