



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE EDAFOLOGÍA

IDENTIFICACIÓN DE LOS PUNTOS CRÍTICOS EN LA NUTRICIÓN DE CULTIVOS EN LA AGRICULTURA PROTEGIDA

DIEGO HUERTA NAVEDA

T E S I S
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO, MÉXICO

2022



COLEGIO DE POSTGRADUADOS
INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

La presente tesis titulada: **IDENTIFICACIÓN DE LOS PUNTOS CRÍTICOS EN LA NUTRICIÓN DE CULTIVOS EN LA AGRICULTURA PROTEGIDA**, realizada por el (la) estudiante: **DIEGO HUERTA NAVEDA**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

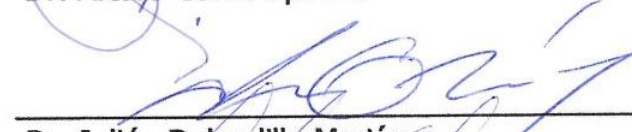
MAESTRO EN CIENCIAS
EDAFOLOGÍA

CONSEJERO (A)



Dr. Arturo Galvis Spinola

ASESOR (A)



Dr. Julián Delgadillo Martínez

ASESOR (A)



Dra. Teresa Marcela Hernández Mendoza

CONSEJO PARTICULAR

Montecillo, Texcoco, Estado de México, México, marzo de 2022

IDENTIFICACIÓN DE LOS PUNTOS CRÍTICOS EN LA NUTRICIÓN DE CULTIVOS EN LA AGRICULTURA PROTEGIDA

Diego Huerta Naveda, M.C.
Colegio de Postgraduados, 2022

RESUMEN

La agricultura protegida tiene entre sus propósitos mejorar la rentabilidad de la producción, aplicando los recursos tecnológicos disponibles como es el fertirriego; sin embargo, a pesar de los beneficios que representan, si no se conducen de manera adecuada, su efecto será contrario al deseado, con riesgo de afectar al ambiente y rentabilidad de la producción. Por lo anterior, para conocer el estado actual del manejo agrícola en la zona de invernaderos del municipio de Tetela de Ocampo, Puebla, se evaluó el ambiente químico del suelo, como consecuencia del uso del fertirriego en la práctica cotidiana de la región. Para identificar los pormenores del manejo que se lleva a cabo, se aplicó un cuestionario elaborado ex profeso a productores cooperantes de la zona, se colectó una muestra de suelo en cada invernadero, además de hacer lo propio en terrenos aledaños sin cultivar. Las muestras se analizaron con base en los criterios establecidos en la NOM-021-RECNAT-2000. Los resultados del análisis químico muestran problemas en la acidez, conductividad eléctrica (valores de hasta 10.98 dS m⁻¹) y nitratos, encontrando suelos con concentraciones con 144 mg kg⁻¹, niveles altos de fósforo hasta 560 mg kg⁻¹ debido a la aportación de materia orgánica y acumulación de la fertilización, y un aumento en las bases intercambiables. Por tanto, el empleo de insumos en un sistema de agricultura protegida provoca alteraciones en la fertilidad del suelo, siendo la materia orgánica, fósforo extractable y conductividad eléctrica los más alterados.

Palabras clave: fertilizantes, acidez, análisis químico, agricultura protegida, conductividad eléctrica.

IDENTIFICATION OF CRITICAL POINTS IN CROP NUTRITION IN PROTECTED AGRICULTURE

Diego Huerta Naveda, M.C.
Colegio de Postgraduados, 2022

ABSTRACT

Protected agriculture has among its purposes to improve the profitability of production, applying the available technological resources such as fertigation; however, despite the benefits they represent, if they are not conducted properly, their effect will be contrary to what is desired, with the risk of affecting the environment and the profitability of production. Therefore, in order to know the current state of agricultural management in the greenhouse area of the municipality of Tetela de Ocampo, Puebla, the chemical environment of the soil was evaluated as a consequence of the use of fertigation in the daily practice of the region. To identify the details of the management that is carried out, a questionnaire prepared expressly was applied to cooperating producers in the area, a soil sample was collected in each greenhouse, in addition to doing the same in surrounding uncultivated land. The samples were analyzed based on the criteria established in NOM-021-RECNAT-2000. The results of the chemical analysis show problems in acidity, electrical conductivity (values up to 10.98 dS m^{-1}) and nitrates, finding soils with concentrations of 144 mg kg^{-1} , high levels of phosphorus up to 560 mg kg^{-1} due to the contribution of organic matter and accumulation of fertilization, and an increase in exchangeable bases. Therefore, the use of inputs in a protected agriculture system causes alterations in soil fertility, with organic matter, extractable phosphorus and electrical conductivity being the most altered.

Keywords: fertilizers, acidity, chemical analysis, protected agriculture, electrical conductivity.

DEDICATORIA

A Dulce, mi esposa por motivarme a continuar.

Delfina, mi madre por todo en la vida.

AGRADECIMIENTOS

Al Conacyt por brindarme apoyo económico para poder realizar los estudios.

Al Colegio de Postgraduados, por ser mi casa de estudios y brindarme una formación de calidad.

Al Dr. Arturo Galvis Spinola, por su magistral forma de enseñar y sus acertados consejos.

Al Dr. Julián Delgadillo Martínez por sus disponibilidad y servicios brindados.

A la Dra. Teresa Marcela Hernández Mendoza por orientarme a pensar.

Al Dr. Juan José Almaraz Suárez por su apoyo y conocimientos compartidos.

Al personal del los laboratorios del Colegio de Postgraduados.

CONTENIDO

RESUMEN	iii
ABSTRACT	iv
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE CUADROS	ix
1. INTRODUCCIÓN	1
2. REVISIÓN DE LITERATURA	2
2.1 La fertilización y la productividad agrícola.....	2
2.2 La fertilización en la agricultura protegida.....	4
2.3 Productividad agrícola y la sobre fertilización	6
2.4 Uso de fertilizantes y su relación con el ambiente	9
2.5 Resumen de la revisión de literatura.....	11
3. OBJETIVOS E HIPÓTESIS	12
3.1 Objetivo.....	12
3.2 Hipótesis	12
4. MATERIALES Y MÉTODOS	12
4.1 Reconocimiento fotográfico y aplicación de encuesta.....	14
4.2 Análisis químico de suelo.....	19
4.3 Análisis de la información	19
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	20
5.1 Reconocimiento y aplicación de la encuesta	20
5.2 Aportación de los nutrimentos por el suelo y eficiencia de recuperación del fertilizante.....	26
5.3 Resultados del análisis químico del suelo.....	34
6. CONCLUSIONES	50
7. LITERATURA CITADA	51

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Distribución física de los punto de colecta de muestras.....	13
Figura 2. Producción en suelo.....	21
Figura 3. Variación de suelos en el municipio de Tetela de Ocampo.....	21
Figura 4. Río Cautolónico.....	22
Figura 5. Bosque de pino y encino.....	23
Figura 6. Sistema de inyección de fertilizantes.	24
Figura 7. Porcentaje de uso de los diferentes fertilizantes por productores en agricultura protegida.	26
Figura 8. Cantidad de productores que elaboran su plan de nutrición de cultivos con asesoría técnica o ellos mismos.	31
Figura 9. Producción en kg m ² año de los productores de jitomate en agricultura protegida.	32
Figura 10. Tendencia del comportamiento del rendimiento del cultivo de jitomate en invernadero con los años.	33
Figura 11. Tipos de enmiendas realizadas al suelo antes de sembrar.....	34
Figura 12. Niveles de P extractable en los suelos en invernadero.....	37
Figura 13. Niveles de nitrógeno extractable en suelos en agricultura protegida.	38
Figura 14. Valores de pH en suelos agrícolas en agricultura protegida.....	40
Figura 15. Niveles de materia orgánica en suelos en agricultura protegida.	41
Figura 16. Tendencia de la conductividad eléctrica (CE) con la suma de los cationes básicos en su forma intercambiable (SCI) y soluble (SCS), de los suelos colectados en invernaderos de Tetela de Ocampo, Puebla.....	46

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Balance de entradas y salidas de nitrógeno en un sistema de agricultura protegida.	28
Cuadro 2. Balance de entradas y salidas de fósforo en un sistema de agricultura protegida.	29
Cuadro 3. Balance de entradas y salidas de potasio en un sistema de agricultura protegida.	30
Cuadro 4. Resultados del análisis químico y físico de los suelos estudiados	36
Cuadro 5. Concentraciones de bases intercambiables y solubles en suelos explotados en agricultura protegida.	44
Cuadro 6. Comparación de análisis químico en diferentes laboratorios de algunos suelos estudiados.	47

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de producción en agricultura protegida requieren una correcta y constante nutrición de los cultivos, las plantas que sufren un estrés nutricional son más susceptibles al ataque de enfermedades, mientras que las que son nutridas correctamente tienden a ser más resistentes, la falta de asesoría especializada en agricultura protegida ha ocasionado que los productores incurran en errores de aplicación de nutrientes, esto ha llevado a utilizar insumos provocando posiblemente alteraciones en las propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo, y en consecuencia en la fertilidad del suelo. Ocasionando pérdidas en los rendimientos de cultivos, dado que el manejo nutrimental en los sistemas de agricultura protegida se enfoca en la obtención de incrementos en los rendimientos.

Determinar la situación de la fertilización en los cultivos en agricultura protegida es muy importante para conocer el estado de fertilidad y sanidad en el que se encuentran los suelos que son sometidos a aplicaciones frecuentes de fertirriego, además permitirá conocer la eficiencia de la fertilización y, detectar el nivel de conocimiento que se tienen en el manejo de nutrición de cultivos. Una manera para obtener esta información es consultando a los productores.

En la actualidad la demanda creciente de alimentos, ha coaccionado a los técnicos agrícolas a hacer más eficientes las técnicas de producción, así como la optimización de los recursos, por tanto, el manejo eficiente en la nutrición de los cultivos es un factor importante para incrementar rendimientos de los cultivos.

El presente trabajo pretende identificar la problemática del manejo de la fertilización de los cultivos en agricultura protegida, para obtener un diagnóstico de la situación actual y las posibles consecuencias del uso de insumos.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 La fertilización y la productividad agrícola

Los nutrientes esenciales influyen de manera decisiva sobre el metabolismo de las plantas y por ende en su productividad, razón por la cual se ha llegado a considerar que la fertilización sea tan importante como la disponibilidad de agua (Sinclair y Rufty, 2012). Esta situación se reconoció así, desde hace más de 150 años a raíz del descubrimiento de los nutrientes y que dio inicio con el desarrollo moderno de la industria de los abonos, la cual comenzó a finales del siglo XIX con la exportación de nitrato de sodio y guano de aves desde Chile y Perú al hemisferio norte (Melillo, 2012), apoyando las demandas de una población en crecimiento que requería altos rendimientos.

Durante la década de 1960, la "Revolución Verde" proporcionó un estímulo adicional para que los productores utilizaran insumos de alto valor de fertilizantes para mantener la máxima productividad posible con nuevos genotipos (Tilman *et al.*, 2002). A finales del siglo XX, problemas ambientales como la contaminación de las aguas subterráneas, liberación de gases de efecto invernadero y eutrofización de los ecosistemas acuáticos se correlacionaron con el uso masivo de fertilizantes en los campos agrícolas (Robertson y Vitousek, 2009).

Cuando la oferta de nutrientes por el suelo excede a la demanda de los cultivos, es posible que se afecte negativamente el rendimiento o, por lo menos, se producen varias respuestas fisiológicas que afectan la calidad de los productos y se reducen los beneficios para los productores, Meneses *et al.*, (2017) evaluó la aplicación de diferentes dosis de potasio en maíz dulce en suelos con una concentración de potasio de 5 cMol (+) kg⁻¹ encontrando que la fertilización con 250 kg de potasio por hectárea no aumento el rendimiento ni hubo una alteración en la concentración foliar del nutrimento, por lo que no se muestra económicamente viable fertilizar pudiendo reducir la fertilización en estas condiciones.

La reducción del rendimiento de un cultivo como consecuencia de un exceso en la adición de nutrientes, particularmente de nitrógeno, se aprecia con mayor frecuencia en árboles frutales y hortalizas frutales como jitomate, pepino y calabacita (Erel *et al.*, 2008;

Stefanelli *et al.*, 2010). Por ejemplo, en la producción de cítricos en Florida, se observó que la dosis de nitrógeno máxima es de 260 kg N anuales por hectárea y al adicionar cantidades mayores, la fruta disminuyó con una tendencia cuadrática (Alva *et al.*, 2006) y en olivos, el número de inflorescencias por rama disminuye con cada aumento de nitrógeno en la zona radicular por encima de 3.4 mM, con la consecuente reducción de fruta recolectada (Erel *et al.*, 2008).

La reducción del rendimiento se asocia con una disminución de la actividad de la enzima nitrato reductasa en las hojas, esta enzima es clave en la asimilación del nitrógeno, además de que limita la velocidad de asimilación y juega un papel importante en el metabolismo de los cultivos, ya es la encargada de reducir el NO₃ para su incorporación a síntesis de glutamina y glutamato, también en proteínas, aminoácidos y demás estructuras de la planta (Hernández *et al.*, 2015) y como consecuencia, conduce a una reducción en la exportación de aminoácidos a los frutos (Okomuto *et al.*, 2011). Otro problema que causa una fertilización superior al óptimo comercial, es que ocasiona pérdidas en la calidad del producto, en brócoli Filho *et al.* (2011), una aplicación de 300 kg de nitrógeno aumentó el rendimiento, pero ocasiono que grietas en la cabeza y reducción de la compactación, y una acumulación de nitratos en las hojas.

En árboles frutales que son fertilizados con una elevada cantidad de nitrógeno, son más vulnerables a ser atacados por enfermedades como bacterias, mostrar una caída prematura de la fruta, el tamaño puede disminuir y la calidad puede deteriorarse (Carranca *et al.*, 2018). En plantas con deficiencia tienen un crecimiento reducido de brotes y, por lo tanto, menos yemas, floración y el cuajado del fruto es menor, disminuyendo el rendimiento (Zekri y Obreza. 2013). En cambio, exceso de N, el desarrollo de brotes de flores y el conjunto de frutas se ven afectados negativamente porque el aumento del crecimiento vegetativo aumenta el sombreado del follaje (Weinbaum *et al.*, 1992). Además, Fernández-Escobar (2008) encontró que el período de polinización efectivo en los olivos se reduce debido a una disminución en la longevidad de los óvulos debido a una fertilización de nitrógeno alta, así como deficiente.

Para el caso de los cereales, la pérdida de rendimiento asociada con el uso excesivo de fertilizante, en cultivos de trigo bien fertilizados, provocó un crecimiento vegetativo

innecesario que puede conducir a una producción excesiva de macollos, lo que ocasiona un aumento en el número de espigas necesarias para alcanzar el máximo rendimiento (Ravier *et al.*, 2017). Por tanto, los niveles elevados en aplicaciones tempranas de fertilización con nitrógeno al cultivo, aumentarían la cantidad de macollos y el crecimiento, lo que aumentaría la competencia por luz entre los diferentes puntos de crecimiento de la planta, lo que provocaría la muerte de los macollos inferiores y secundarios (Gastal *et al.*, 2015).

2.2 La fertilización en la agricultura protegida

Los cultivos hortícolas suelen ser preferidos para ser producidos bajo condiciones de invernadero, ya que el precio de venta superara significativamente su inversión, razón por la cual es muy rentable esta forma de manejo. A su vez, a medida que se controlan más variables que inciden sobre la biomasa producida, es viable conseguir mayor productividad e incluso ampliar las temporadas de cultivo en comparación con los cultivos de campo abierto (Pérez *et al.*, 2018).

Los invernaderos presentan beneficios y problemas, por un lado, se promueve la captura de carbono en el suelo, una disminución de uso de agua por el consumo del cultivo, y una mejor protección al suelo a erosión dentro de la unidad de producción, protección del suelo a lluvia ácida, por el otro, la prolongación de temporadas e intensificación del sistema requiere de mayor cantidad de algunos recursos, en especial fertilizantes y plaguicidas, así como uso de plásticos, lo que repercute en un impacto ambiental negativo (Chang *et al.*, 2013). En este mismo sentido, en una adaptación de lo mencionado por Hardin (1968) y parafraseando a ese autor, en el esfuerzo de mejorar la productividad del cultivo, se suele sacrificar la viabilidad a largo plazo de un recurso, para obtener ganancias a corto plazo. Esto ejemplifica con claridad los excesos que se suelen cometer en diversos sistemas agrícolas y la agricultura protegida definitivamente no es la excepción como es el caso de la aplicación desmedida de nutrientes en aras de maximizar la productividad en el corto plazo, en detrimento del ambiente a largo plazo, independientemente del origen del insumo elegido, ya sea de tipo orgánico o mineral.

Al contrastar los sistemas hortícolas con la producción de cultivos extensivos (p. ej. cereales), los primeros requieren de mayor exigencia, atención y precisión en el manejo y aplicación de agroquímicos, fertilizantes y agua de riego más preciso, debido a que la pérdida por lixiviación de nitrato es mayor en hortalizas, ya que el sistema radicular que presentan tiene una capacidad de recuperar en menor grado el fertilizante aplicado que los sistemas radiculares de los cereales (Zhang *et al.*, 2017). Tal situación ha hecho que cada vez sea más frecuente detectar usos excesivos e indebidos de diversos insumos agrícolas en los sistemas intensivos, incluyendo terrenos de pequeños agricultores, donde se ha triplicado el aporte de nutrientes por unidad de superficie (Gao *et al.*, 2012).

Tales excesos repercuten en acumulación de compuestos químicos en el perfil del suelo y su salida hacia mantos freáticos o a la atmósfera (Wang *et al.*, 2018), según sea el proceso que ocurra con los diferentes elementos químicos presentes en el medio, pero en todos los casos contribuyen a la contaminación ambiental, pérdida de biodiversidad y afectaciones a la salud humana (Bouwman *et al.*, 2009; Gutiérrez *et al.*, 2018; Yu *et al.*, 2019). Al detectar los errores en los que se incurre al fertilizar indebidamente, permitiría estudiar y conocer métodos eficientes de fertilización, optimizándola aplicación de fertilizantes para en lo posible, aplicar lo más cerca de la demanda del cultivo, para evitar que los excedentes provoquen algún tipo de contaminación.

Entre los efectos adversos de la aplicación excesiva de insumos agrícolas está la alteración de las condiciones del medio productivo, lo que se refleja en el incremento de la acidez (Tian y Niu, 2015), esto debido al uso de fertilizantes nitrogenados, el amonio puede desplazar a los cationes básicos (calcio, magnesio, sodio y potasio) hacia la solución del suelo facilitando su lixiviación lo que reduce la capacidad del suelo de amortiguar la acidificación y salinización de los terrenos (Negi *et al.*, 2013). También durante el proceso de nitrificación, la oxidación del amonio libera protones H^+ . De hecho, aplicaciones prolongadas y mayores a lo que se requiere de estiércol o de fertilizantes minerales, induce a la acumulación de sales en la capa arable (Shen *et al.*, 2010), con efectos perjudiciales directos sobre el crecimiento de las plantas, porque en esa zona es donde exploran las raíces de la mayoría de los cultivos.

En China, la producción de hortalizas en invernadero se ha convertido en una fuente importante de alimentos, sin embargo, se pueden acumular varios contaminantes en los suelos, Hu *et al.* (2017) realizó una revisión del estado actual de los suelos donde se producen vegetales en invernadero, los resultados indicaron una reducción en el pH del suelo, y el desequilibrio de nutrientes, en cambio, fungicidas, antibióticos, metales pesados fueron los principales contaminantes encontrados.

La producción en invernaderos ha causado algunas preocupaciones como lo es la pérdida de calidad de los suelos, contaminación de suelo y sobre todo a vegetales, este último teniendo un impacto negativo en la salud humana (Jacob y Kakule, 2012).

2.3 Productividad agrícola y la sobre fertilización

Los insumos agrícolas empleados como materiales fertilizantes suelen afectar la calidad del ambiente cuando se hace de manera inadecuada, y provocando eutrofización de los diversos ecosistemas acuáticos (EPA, 2007), cuando se aplican cantidades mayores a las que realmente se requieren. La aportación de nitrógeno y fósforo son necesarios para obtener un buen rendimiento, pero la pérdida de estos, por arrastre a ríos y a favor del viento, disminuye la calidad ambiental y el bienestar humano (Vitousek *et al.*, 2009), donde el vínculo entre la agricultura y su efecto contaminante está claramente establecido afectando al agua potable siento el nitrato el principal contaminante en el agua, asociándolo a enfermedades como el síndrome del bebé azul y a cánceres del tracto digestivo, sin embargo, una agricultura sin fertilizantes no es opción para la población actual y para los 9 mil millones de personas estimadas para el 2050 que deben de ser alimentados (Powlson *et al.*, 2008). Además, en seguimiento con lo establecido por la agencia de protección ambiental de los Estados Unidos (EPA), la actividad agrícola influye de manera relevante sobre el equilibrio de los tres gases de efecto invernadero antropogénicos (GEI) más significativos: dióxido de carbono (CO₂), óxido nitroso (N₂O) y metano (CH₄). Las actividades agrícolas aportan hasta un 30% de los gases de efecto invernadero, tan solo durante el periodo de 2000 a 2010 hubo un aumento de 1.1% anual de las emisiones, llegando a 4.6 Gt de CO₂ anual, en el 2010 hasta 5.4 Gt de CO₂ anual, debido a emisiones de quema de biomasa y suelos orgánicos incluidos.

De acuerdo con Good y Beatty (2011) el uso de elevadas dosis de fertilizantes nitrogenados aumenta el rendimiento económico de los cultivos a corto plazo, pero esto puede causar daño al ambiente a largo plazo. Por ello, una opción sería establecer límites al empleo de insumos empleados como materiales fertilizantes y así evitar incurrir en excesos; estos autores sugieren como posible alternativa mejorar las estrategias de manejo, destacando entre estas al tipo de labranza, precisar la dosis y momento de aplicación de los fertilizantes, mejorar las fuentes de fertilizantes, prefiriendo los de liberación controlada a los altamente solubles, inoculantes, fijación biológica de nitrógeno, variedades con mayor eficiencia para aprovechar los nutrientes del suelo, entre otros aspectos, con el propósito de reducir la cantidad de fertilizantes nitrogenados en un 20% para el 2050.

Como ejemplo de lo anterior, con el propósito de apoyar la seguridad alimentaria interna de China, en su política agrícola se alentó incrementar el uso de fertilizantes, llegando incluso a la aplicación de cantidades alrededor de los 600 kilogramos de nitrógeno por hectárea, situación que rebasa con creces las necesidades del cultivo para alcanzar un rendimiento óptimo (Ju *et al.*, 2009). Esto se obtuvo a partir del cálculo del promedio de las tasas de N económicamente óptimas, es decir cuando el punto de tasa de N del valor marginal de la producción de grano es igual al costo marginal de la fertilización con N, todo esto basado en varios experimentos de campo en manejo de cultivos de secano en la región. Sin embargo, estos mismos autores estimaron que si se reduce entre 30% y 60% el empleo de fertilizantes en China, no afectaría necesariamente la productividad de los cultivos, luego de que se evaluaron diferentes dosis de fertilización de nitrógeno en cultivos por varios años, sin encontrar diferencias significativas ($P > 0.05$), lo que indica que se pueden lograr óptimos rendimientos de cultivos similares con dosis bajas de fertilizantes nitrogenados debido al aumento del suministro de N nativo del suelo.

Es posible que, si se mejoran las prácticas de manejo de la fertilización, haya un uso menor de insumos agrícolas sin que ello implique pérdidas de productividad, pero para ello habrá que tener un balance nutrimental apropiado y optimizar la eficiencia con la que se aprovechan los nutrientes contenidos en los materiales fertilizantes aplicados.

En los países en vías de desarrollo como es el caso de México, se necesitan aumentar las dosis de fertilizantes, pero esto debe estar acorde con la creación de estrategias de gestión sitio-específicas, para incidir de manera positiva sobre la productividad agrícola y sin incurrir en la aplicación excesiva de insumos, para esto se necesitará la implementación de experimentos para evaluar los rendimientos y el impacto negativo al ambiente de la fertilización, con el fin de conocer los valores óptimos de fertilización de los diferentes cultivos y bajo las diferentes condiciones de suelos con las que contamos. Como ejemplo de esta situación, para el caso de cereales producidos en China, se redujo la aplicación de fertilizantes hasta en 60% sin que hubiese consecuencias negativas en productividad (Ju *et al.*, 2009). A su vez, los arroceros japoneses utilizan ahora 10% menos fertilizantes que en el pasado, sin que hubiese significado alguna pérdida en su rendimiento.

Este éxito se atribuyó al uso de la variedad de arroz llamada Koshihikari, la cual es más eficiente en el aprovechamiento de nutrientes como N y fósforo, debido a la estructura de su sistema radicular que hace más eficiente la recuperación de estos nutrientes y a la vez mantiene una alta productividad, ya que hay una acumulación de nutrientes en el suelo por la aplicación en años anteriores de estiércol y fertilizantes (Mishimna *et al.*, 2006).

De acuerdo con los trabajos de Dobermann *et al.* (2002), se observó que en Japón se relacionaba un adecuado rendimiento de arroz con una eficiencia de recuperación de nitrógeno elevada. En contraste, en China también con buena productividad, tenía una eficiencia muy pobre, con la consecuente diferencia en la cantidad de fertilizante que se empleaba en ambos países. Esto motivó al desarrollo de un programa organizado por el Instituto Internacional de Investigación del Arroz (IRRI), en el cual se logró un incremento de 7% de arroz, haciendo un uso equilibrado de fertilizantes y aplicando menos insumos. Algo similar ocurrió en Estados Unidos, donde su Departamento de Agricultura evaluó el fertilizante utilizado para producir maíz entre 1980 y 2000, incrementando su productividad en 35% sin aumentos significativos en el empleo de fertilizantes (Cassman *et al.*, 2002).

2.4 Uso de fertilizantes y su relación con el ambiente

La dosis óptima económica se refiere a la cantidad de fertilizante que permite alcanzar el máximo rendimiento económico (Scharf *et al.*, 2005). Ese valor implica una restricción de índole económica a la cantidad de insumo a aplicar, ya que de hecho es inferior al rendimiento fisiológico. Es importante conocer la dosis óptima económica de los cultivos, bajo las diferentes condiciones edáficas, lo que permite al productor no solo un ahorro en fertilizante, también un ahorro en la inversión económica, si fertilizáramos a los cultivos con las necesidades que requieren o hasta el punto de alcanzar el máximo de su potencial biológico las dosis mayores y esto no siempre es rentable ni al productor ni beneficioso al ambiente. Al respecto, Kim y Dale (2008) consideran que ahora lo que hace falta es incluir un criterio ambiental y no únicamente tomar en cuenta criterio netamente de índole monetario. Dichos autores han ido más allá y proponen que a la cantidad que sea elegida desde el punto de vista económico, se disminuya en 25 kg de nitrógeno por hectárea para favorecer al ambiente. Sin embargo, esto debe considerar otros factores como las condiciones en las que se desarrolle el cultivo, ya que no es la misma eficiencia del fertilizante en suelos arenosos que en suelos con alto contenido de arcilla, además el tipo de cultivo también afecta en la recuperación de fertilizantes, por lo que no se puede generalizar alguna recomendación, se tiene que ser más específico considerando lo antes mencionado, para tener datos precisos que hagan sostenible el uso de fertilizantes.

El material fertilizante, ya sea orgánico o inorgánico, libera sus nutrientes (nitratos, potasio, calcio, magnesio, fósforo, entre otros) a una tasa específica según sean las condiciones del medio y, cuando no, no es absorbido por el cultivo, se puede dirigir hacia el ambiente a través de la desnitrificación, pérdida de potasio, hacia los cuerpos de agua superficiales mediante la escorrentía o bien, hacia los mantos freáticos a través de la lixiviación, la acumulación de fósforo en suelos por la reacción rápida de los fertilizantes con el suelo solo permiten una fracción disponible inmediatamente para las plantas. Por lo tanto, siempre hay un riesgo de que los acuíferos, ríos, lagos y océanos se enriquezcan con nitrógeno, fósforo, magnesio, sodio sin importar el tipo y origen del insumo agrícola empleado.

Desde luego, la magnitud de las pérdidas es muy distinta entre ambientes (suelo y clima), así como del tipo de sistema de producción y manejo agrícola, donde todo en conjunto hace que dichas variables cambien drásticamente. En este orden de ideas, para el caso de cereales Cassman y Dobermann (2002) estimaron que de 30% a 50% del nitrógeno aplicado es absorbido realmente por la planta, razón por la cual suponen que el cultivo ocupa aproximadamente 40% del nitrógeno disponible y el 60% restante como excedente.

Dentro de esta misma temática, el principal problema del uso de fertilizantes es el exceso, debido a que resulta difícil suministrar con precisión la cantidad de N para satisfacer los requerimientos de los cultivos y, al mismo tiempo controlar el destino del N que no pudo ser aprovechado para evitar contaminación al ambiente, la pérdida de gases como amoníaco, óxido nítrico y óxido nítrico, reducen la calidad del aire y representan parte de la contribución de la agricultura a la contaminación del ambiente (Cassman y Dobermann, 2021). Debido a esto, en los últimos años la preocupación pública por la contaminación por N en muchos países ha llevado a la adopción de medidas reglamentarias y a una serie de políticas relacionadas con la contaminación que puede causar el N al ambiente (Kanter *et al.*, 2020). En Estados Unidos se ha implementado una política voluntaria utilizando la ley del equilibrio del nitrógeno que se basa en el balance entre la diferencia de las entradas de N y las salidas de las pérdidas en un sistema de producción agrícola, como medio para alcanzar los objetivos ambientales hacia la reducción de la contaminación (McLellan *et al.*, 2018). Una alternativa propuesta como una vía para reducir las emisiones de N₂O, es la modificación genética de las raíces para inhibir la nitrificación biológica al suprimir la actividad en el suelo a través de la producción y liberación de inhibidoras del proceso (Subbarao *et al.*, 2017). Sin embargo, aunque esto es posible, habría que analizar qué impacto lograría tener en la reducción de emisiones de N₂O, y sobre todo si es aplicable a todas las plantas, por lo que, es posible que no sea la solución que se necesita para enfrentar este problema.

Aproximadamente el 40% de nuestros alimentos no serían posibles de producir sin la síntesis de amoníaco, por ser este la materia prima más importante para los fertilizantes nitrogenados y sus derivados (Pfromm, 2017), pero este proceso consume el 2% de la

energía fósil a través del proceso de Haber-Bosch, además por cada tonelada producida de amoníaco se libera 1.5 toneladas de CO₂. A nivel mundial el 18% del nitrógeno aplicado se pierde por la emisión de amoníaco, lo que tiene efectos negativos en los equilibrios ambientales (Li *et al.*, 2018), éste mismo autor propone que minimizar las pérdidas de nitrógeno por volatilización de amonio y maximizar los rendimientos con tecnologías de fertilización efectivas en sistemas de cultivo intensivo es esencial para una agricultura sostenible.

En cultivos de arroz y trigo, la emisión de amoníaco representa una crucial pérdida de N, principalmente cuando la fuente de nitrógeno es urea (Yao *et al.*, 2018). En china la calidad del aire se ve afectado por la presencia de amonio emanando de áreas agrícolas que aportan grandes cantidades de volatilización de amonio, por tanto, es urgente tomar medidas para minimizar el impacto ambiental que causa el amoníaco (Gu *et al.*, 2012). En Estados Unidos han encontrado que el 45% de los ríos y 46% de los lagos se ha degradado por presencia de nutrientes como nitrato y fósforo de fuentes agrícolas (Bricker *et al.*, 2007).

2.5 Resumen de la revisión de literatura

El sistema de agricultura protegida permite prolongar y tener más ciclos de cultivos, pero para lograr esto se necesitan aplicar insumos en cantidades importantes, si no se tiene cuidado se pueden aplicar cantidades que tengan un efecto negativo tanto al cultivo como al suelo, uno de estos insumos es la aplicación de fertilizantes, al no aplicar la dosis necesaria, provoca problemas de contaminación y un aumento en las concentraciones de los cationes calcio, magnesio y potasio en el suelo a niveles en donde afectan el correcto desarrollo del cultivo.

3. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

3.1 Objetivo

Identificar las consecuencias del uso de fertilizantes utilizados en agricultura protegida y sus efectos, sobre la fertilidad de los suelos, para conocer el estado actual en el que se encuentran.

3.2 Hipótesis

La aplicación de fertilizantes en el sistema de agricultura protegida, tiene impactos negativos en los suelos, lo que provoca cambios en los equilibrios en la fertilidad de suelos.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se centró en los invernaderos del municipio de Tetela de Ocampo, Puebla, los cuales se destinan a producir jitomate desde hace 20 años, el suelo dominante es Luvisol (81%), el clima es templado húmedo con abundantes lluvias en verano (54%), precipitación de 600 a 1600 mm, con rango de temperatura de 12 - 20 °C (INEGI. 2022), la agricultura protegida en esta zona nace por la rentabilidad que este cultivo y sistema ofrece a los productores en comparación con los cultivos extensivos.

Se realizó un diagnóstico de la condición actual del ambiente químico de los suelos en el sistema de agricultura protegida de la región, para lo cual se procedió de la siguiente manera: a) se trabajó con 30 agricultores cooperantes de la región, que representan 10% del total de productores o 10% de superficie agrícola bajo invernadero; b) se aplicó un cuestionario a los productores de la zona, elaborado ex profeso con el propósito de investigar previamente las características del manejo de la fertilización para obtener información que permitió relacionarla con los cambios en el estado químico del suelo; c) de cada invernadero se colectó una muestra de suelo y, como referencia de la condición original, también se hizo lo propio en terrenos sin cultivar (Figura 5).

El cuestionario incluyó 36 preguntas, el cual fue elaborado ex profeso para obtener información sobre el manejo agrícola que realizan los productores de la zona, el cual

incluyó fuentes de insumos, dosis, épocas de aplicación, superficie del invernadero, en su mayoría preguntas cerradas de respuesta que permitió dirigir las opciones del encuestado.

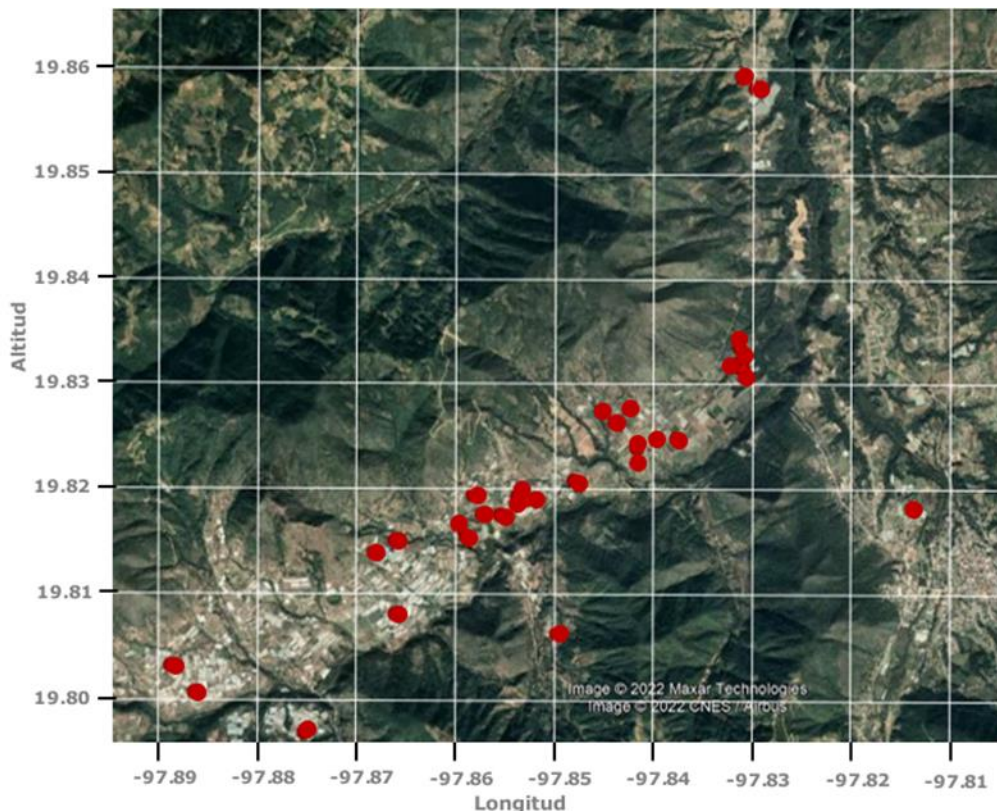


Figura 1. Distribución física de los puntos colecta de muestras.

En cada unidad de producción de los productores cooperantes, se tomó cinco submuestras de suelo a 0-20 cm de profundidad para formar una muestra compuesta, a mitad de la cama, evitando la línea de goteo, extremos, y orillas, siguiendo las recomendaciones de la Norma establecida para tales efectos (NOM-021-RECNAT-2002) las cuales, a su vez, fueron analizadas de acuerdo con la citada normatividad en los laboratorios del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Las determinaciones obtenidas fueron las siguientes: pH, conductividad eléctrica, materia orgánica, nitrato, nitrógeno total, amonio, textura, fósforo (Olsen), bases intercambiables y sus respectivas formas solubles.

4.1 Reconocimiento fotográfico y aplicación de encuesta

Durante los meses de enero a abril de 2021, se efectuó un recorrido por la zona agrícola del municipio de Tetela de Ocampo, Puebla, recorriendo diferentes áreas de la zona, durante el cual, se tomaron las coordenadas geográficas de diferentes puntos a través de la aplicación GeoPosicion Lite 5.0, se tomaron fotografías de los puntos de referencia con cámara digital. Esto con motivo de obtener información para hacer una descripción de la zona de estudio y conocer las condiciones ambientales y productivas de la agricultura protegida.

Se elaboró un cuestionario que permitió conocer la forma en que los productores manejan su programa de nutrición de cultivos, las condiciones de sus unidades de producción, sistema de riego y los fertilizantes utilizados, toda la información ayudo a conocer los orígenes de la problemática que se está presentando en los suelos de la zona de estudio, las preguntas utilizadas en la encuesta se muestran a continuación:

1. ¿Cuántos años de establecido tiene su unidad de producción?
A. Nuevo B. 1 a 5 años C. Más de 5 años
2. ¿Cuántos años de experiencia tiene en el manejo de cultivos en agricultura protegida?
A. Nuevo B. 1 a 5 años C. 5 a 10 años C. Más de 10 años
3. ¿Cuántas veces siembra por año?
A. 1 B. 2 C. Más de 2
4. ¿Cuál es la superficie de invernadero que tiene?
A. 1000 a 3000 m² B. 3000 a 5000 m² C. Más de 5000 m²
5. ¿Cuál es su sistema de riego?
A. Cintilla B. Espagueti C. Otro_____
6. ¿Cuál es su sistema de inyección de fertilizantes?
A. Venturi B. Arrastre C. Otro_____
7. ¿Qué tipo de fertilizantes utiliza?
A. Químicos solubles B. Fórmula C. Orgánicos
8. ¿Por qué usa este tipo de fertilizante?

A. Baratos B. Eficientes C. Accesibles D. Recomendación

9. ¿Maneja la dosis de fertilización por etapas?

A. Si B. No C. No sabe

10. ¿Fertiliza todos los días?

A. Si B. No C. No sabe

11. ¿Cuántos kilogramos de fertilizante inyecta por aplicación en 1000 m²?

A. 1 a 3 B. 3 a 5 C. Más de 5

12. De los siguientes fertilizantes ¿Cuáles emplea?

Nitrato de potasio_____ Sulfato de potasio_____

Nitrato de calcio_____ Sulfato de magnesio_____

Nitrato de amonio_____ Sulfato de amonio_____

Nitrato de magnesio_____ Fosfato de potasio_____

Cloruro de potasio_____ Fosfato de amonio_____

15-30-15_____ 15-9-26_____

13. ¿Cuánta cantidad de fertilizante compra por año?

Nitrato de potasio_____ Sulfato de potasio_____

Nitrato de calcio_____ Sulfato de magnesio_____

Nitrato de amonio_____ Sulfato de amonio_____

Nitrato de magnesio_____ Fosfato de potasio_____

Cloruro de potasio_____ Fosfato de amonio_____

15-30-15_____ 15-9-26_____

14. ¿En qué cantidad de agua aplica el fertilizante?

Litros_____

15. ¿Cambia la cantidad de fertilizante aplicado entre ciclos de producción?

A. Si B. No C. Mantiene

16. ¿En qué se basa para planear su programa de fertilización?

A. Técnico B. Experiencia propia C. Otra

17. ¿Recibe asesoría para el manejo de la fertilización de su cultivo?

A. Si B. No C. No sabe

18. Si recibe asesoría ¿en qué sector labora su técnico?

A. Industria de agroquímicos B. Independiente C. Institución

19. ¿Ha recibido capacitación en temas de manejo de nutrición de cultivos?
A. Si B. No C. No sabe
20. ¿Conoce el efecto de los diferentes fertilizantes que aplica?
A. Si B. No C. No sabe
21. ¿Realiza análisis de suelo?
A. Si B. No C. No sabe
22. Si realiza análisis de suelo ¿en qué laboratorio lo realiza?
A. Universidad B. Privado C. Otro
23. Si realiza análisis de suelo ¿qué tipo de análisis realiza?
A. Fertilidad de suelo B. Agua C. Extracto de pasta
24. Si realiza análisis de suelo ¿cada cuánto lo realiza?
A. 2 veces por año B. Una vez por año C. cada 2 años o más
25. ¿Cuál es el rendimiento de su cultivo en 1000 m²?
A. 10 a 15 ton B. 15 a 20 ton C. Más de 20 ton
26. ¿Cómo se ha comportado el rendimiento a lo largo de los años?
A. Aumentado B. Disminuido C. Mantenido
27. ¿Conoce el problema de salinidad en el suelo?
A. Si B. No C. No sabe
28. En caso de que conozca el problema ¿considera la salinidad un problema de producción?
A. Si B. No C. No sabe
29. ¿Conoce las consecuencias de aplicar fertilizantes en exceso?
A. Si B. No C. No sabe
30. ¿Considera que tiene problemas de salinidad en su suelo?
A. Si B. No C. No sabe
31. En caso de que tenga problemas de salinidad ¿conoce los métodos de manejo de la salinidad?
A. Si B. No C. No sabe
32. En caso de que tenga problemas de salinidad ¿realiza alguna acción para su manejo o corrección?
A. Si B. No C. No sabe

33. ¿Conoce el tipo de suelo que tiene?

A. Si B. No C. No sabe

34. Si lo conoce ¿qué clase textural tiene?

A. Franco B. Arcilloso C. Arenoso

35. ¿Realiza alguna enmienda a su suelo antes de sembrar?

B. Química B. Orgánica C. Otra

36. ¿Cuál considera es la principal limitante del rendimiento de su cultivo?

A. Nutrición B. Plagas y enfermedades C. Clima

La encuesta ayudó a obtener un conjunto de información detallada, actualizada y completa del sector agrícola a nivel regional de la agricultura protegida, lo que permitió conocer las principales características de la forma en que nutren sus cultivos los productores en agricultura protegida de la zona en estudio, también permitió obtener resultados que permitieron comparar la información de cómo se utilizan los fertilizantes, todo esto sirvió como instrumento necesario para determinar la forma de ejecutar los análisis químicos.

Las preguntas se elaboraron en función de la información que se quería obtener, la población objetivo, identificación del problema, selección de la muestra, organización del trabajo de campo, obtención, interpretación y análisis de los datos, por lo anterior se determinó utilizar la técnica de la encuesta como procedimiento de investigación por ser un método que permite obtener información de manera rápida y eficaz si se aplica de manera correcta.

La información de la encuesta permitió conocer las cantidades y los tipos de fertilizantes que cada productor encuestado utiliza hasta el momento de la aplicación de la misma, su rendimiento y considerando los resultados de concentración de los nutrientes del análisis químico, la capacidad de recuperación de nutrientes en el suelo por la raíz del cultivo, la eficiencia del fertilizante y el contenido de arcilla del suelo, ayudó hacer un balance sobre las entradas y salidas de nutrientes y conocer si las cantidades aplicadas son las necesarias o hay un déficit o una aplicación superior a la demandada por el cultivo.

Con los resultados de la encuesta y el análisis químico, la capacidad de recuperación de nutrientes en el suelo por la raíz del cultivo, la eficiencia del fertilizante y el contenido de arcilla del suelo, se hizo un balance sobre las entradas y salidas de nutrimentos para conocer si las cantidades aplicadas son las necesarias, existe un déficit o una aplicación que supera la demandada por el cultivo. Para el balance, primero se calculó la eficiencia de recuperación del fertilizante, para el caso del nitrógeno se utilizó una eficiencia del 50% considerado como estándar medio (Ramos *et al.*, 2002), para fósforo 10% (Baligar, 2001) y para potasio se consideró el contenido de arcilla (Rodríguez, 1993) con una recuperación de 50%, 60% y 70%, los cálculos se realizaron con las siguientes ecuaciones:

$R_F = \text{Cantidad de fertilizante aplicado (kg ha}^{-1}) / \text{Eficiencia de recuperación del fertilizante (\%)}$

$R_C = \text{Concentración del elemento en el análisis químico (mg kg}^{-1}) \times \text{Capacidad de recuperación del nutrimento por el cultivo (C}_{RN})$

$E_C = \text{Rendimiento (t)} \times \text{Requerimiento interno (kg)}$

$D = R_F + R_C$

$R = D - E_C$

Donde:

$R_F = \text{Recuperación del elemento del fertilizante aplicado}$

$R_C = \text{Recuperación del elemento por el cultivo}$

$C_{RC} = 2.5 \text{ kg para Nitrógeno}$

1.3 kg para fósforo

1.1 kg para potasio con >30% de arcilla

1.2 kg para potasio con 20% de arcilla

1.3 Kg para potasio con <10% de arcilla

E_c = Extracción del nutrimento por el cultivo

D = Disponibilidad del nutrimento

R = Residualidad del nutrimento

Los valores de potasio y fósforo se convirtieron a K_2O y P_2O_5

4.2 Análisis químico de suelo

El análisis químico de las muestras, se realizó en los laboratorios del Colegio de Postgraduados Campus Montecillos siguiendo el procedimiento establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Las muestras se secaron a temperatura ambiente y bajo sombra, se molieron y tamizaron con un tamiz (0.5 mm de diámetro) para determinar Materia Orgánica, Textura, pH y Conductividad Eléctrica y 2 mm para el resto de parámetros.

4.3 Análisis de la información

Los datos del análisis químico del suelo y el rendimiento del cultivo de jitomate se analizaron de la siguiente manera: a) se sometieron a una prueba de normalidad de varianza b) una vez determinados los supuestos se realizó un análisis de componentes principales (C_P) c) se hizo un análisis de correlación de Spearman, utilizando el programa Minitab® versión 18. Los datos se estandarizaron antes de realizar el ACP, de esta forma todas las variables se ajustaron a una media de cero y una desviación estándar de uno, para evitar que las variables de escala mayor dominaran al resto, la matriz de datos se analizó por correlación, el número de componentes principales a estudiar se determinó por medio del valor propio o también llamados valores característicos es decir, la cantidad de información de cada componente, en donde siguiendo el criterio de Kaiser solo se usaron los componentes con valores superiores a 1. Para el análisis de correlación se hizo una prueba de distribución normal de varianza, algunas variables no presentaron distribución normal, por tanto, se determinó utilizar el método de correlación Spearman que permite analizar datos con valores extremos, evitando la desviación de la tendencia.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En los Cuadros 1 a 3 se presentan los balances de las entradas y salidas del nitrógeno, fósforo y potasio en un sistema de agricultura protegida, en el Cuadro 4 los resultados del análisis químico del suelo.

5.1 Reconocimiento y aplicación de la encuesta

El inicio de la agricultura protegida en el municipio de Tetela de Ocampo, surge por el año 2000, cuando un grupo de productores en asociación, construyen el primer módulo de invernadero en la comunidad de las Besanas, la superficie de este invernadero fue de 7000 m² con apoyo del gobierno estatal y federal, el invernadero fue de tipo cenital con estructura de acero galvanizado tipo PTR, con cubierta plástica de polietileno con un porcentaje de sombra al 25%, la distancia entre claros fue de 3.0 m y arcos de 7.4 m.

El invernadero fue comprado a una empresa que contaba con relación con el gobierno para ejecutar los programas de agricultura protegida, que el entonces gobierno estatal daba a los productores del campo poblano. En los primeros años, se producía en hidroponía en bolsas de plástico color negro de 20 litros.

El sustrato utilizado es tezontle rojo, material disponible en la región, el sistema de riego era tipo espagueti impulsado por bomba eléctrica, la inyección de fertilizantes por Venturi, y cubierta plástica en el suelo, sin embargo, el incremento en los costos de producción, principalmente el de los fertilizantes, hizo que los productores cambiaran de sistema, implementando la siembra en suelo (Figura 2), en camas cubiertas con acolchado plástico bicolor, y el sistema de riego fue por cintilla, la inyección de fertilizante por arrastre.

Actualmente, la mayoría de los productores produce en suelo que presentan variación en la zona (Figura 3), las cubiertas plásticas han variado, en algunos casos utilizan plástico térmico, la superficie de los invernaderos varía de 1000 m² hasta una hectárea, con un promedio por productor de 3000 m², la orientación del invernadero no es tomada en cuenta para su construcción, el productor construye el módulo en función de la forma y superficie de su terreno, la orientación de la ventila cenital, tampoco es considerada en

función de las corrientes dominantes del viento, son colocadas a criterio del productor, en ocasiones colocas en posición de frente una contra la otra, lo que limita los golpes de aire en el invernadero.



Figura 2. Producción en suelo.

La mayoría de los invernaderos de la zona en estudio son de tipo cenital, esto debido a que las empresas de invernaderos vendían este tipo de invernadero, actualmente por cuestión de costos del acero, se están construyendo macrotúneles, y los productores salen a buscar invernaderos de uso a diferentes zonas, una de los invernaderos de uso más comprados son de tipo sierra.



Figura 3. Variación de suelos en el municipio de Tetela de Ocampo.

El agua de la región utilizada para riego de los cultivos, es tomada del río de la región (Figura 4). La conducción del agua hacia las unidades de producción es a través de un canal de concreto a cielo abierto, rodada por gravedad. Es almacenada en represas de mampostería. Existen en la región dos canales de riego Canal 01. Tonalapa y Canal 02. Cuapancingo, en ambos canales se toma el agua del mismo río. El bosque es dominado por pino blanco y algunas zonas de encino (Figura 5), también hay presencia de palma, sabino y elite en los costados de los ríos.



Figura 4. Río Cautolónico.

La totalidad de productores utilizan el sistema de riego por cintilla con emisores a cada 10 cm, que tiene la ventaja de poder aplicar cantidades pequeñas de agua, pero frecuentes. El 90% de los productores inyecta los fertilizantes por medio del método conocido como Arrastre (Figura 6), solo el 10% utilizan el dispositivo Venturi, el primer sistema presenta la ventaja de utilizar menos piezas lo que reduce el costo del sistema y su instalación la pueden hacer los mismos productores sin embargo, por ser un sistema remoto se pueden cometer errores en la calibración de inyección del fertilizante, lo que

puede subestimar la dosis aplicada, el segundo sistema necesita más piezas para su instalación, aumentando el costo pero al mismo tiempo presenta la ventaja por tener mejor control en la dosificación de los fertilizantes.



Figura 5. Bosque de pino y encino

El 97 % de los productores fertiliza todos los días. La totalidad de los productores emplea fertilizantes químicos solubles, la demanda de estos fertilizantes ha aumentado en los últimos años, debido al crecimiento que ha tenido la agricultura protegida, México es uno de los países que muestra mayores niveles de utilización de fertilizante (Reyes, 2017).



Figura 6. Sistema de inyección de fertilizantes.

De acuerdo al criterio de los productores el costo de los fertilizantes, representan el 30% del costo de producción, porcentaje que aumentará para los ciclos de producción, si los precios de los fertilizantes mantienen su aumento (60% a 80%). lo anterior debido de una crisis energética en la producción de fertilizantes nitrogenados por aumento del precio del gas a nivel internacional. Los costos de producción para los productores en fertilizantes representarían 42% del costo de producción total, lo que implicaría una reducción en las ganancias de los productores ya que tienen que invertir más, ahí la importancia de este estudio, que tiene como objetivo conocer el estado de los suelos y de esta manera analizar los recursos nutrimentales que se tienen, para poder aprovechar la disponibilidad de nutrientes que ayuden reducir los costos por uso de fertilizantes.

El área analizada abarca 76,300 m² y se aplican en total 86,775 kg de fertilizantes durante el periodo más frecuente de cortes de frutos comercializables, lapso que la gente

de la zona asocia con la mayor demanda de nutrientes, lo que equivale a adicionar fertilizantes a una tasa de $1.14 \text{ kg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. La inyección de fertilizantes en el sistema de riego equivale a 9 kg m^{-2} en promedio, cuyo ámbito de exploración varía desde $\leq 8 \text{ kg m}^{-2}$ en 63% de los casos, hasta 20 kg m^{-2} o más, en 23% de los invernaderos.

En la región se emplean en total 12 tipos de fertilizantes, aunque 71% de los insumos se centran sólo en cuatro fuentes: nitrato de calcio (27%), sulfato de potasio (17%), nitrato de potasio (14%) y sulfato de magnesio (13%), de las que se aplica en promedio 0.79, 0.51, 0.41 y 0.39 kg m^{-2} , respectivamente. En 57% de los sitios se diluye la dosis en 7 m^3 de agua y en donde se usan más insumos, el volumen supera los 20 m^3 . (Figura 7). Las fuentes de fertilizantes utilizadas en menor grado son cloruro de potasio y sulfato de amonio. El resto de los fertilizantes muestra un uso variado en las preferencias de los productores. Cuando se hace empleo de fertilizantes químicos aplicando cantidades que superan las necesidades del cultivo, provocan la contaminación de recursos como el suelo y agua (Quiñones *et al.*, 2012). Los productores han aplicado fertilizantes en cantidades mayores a los requerimientos, provocando la acumulación de estos en el suelo y las pérdidas de algunos por lixiviación, lo que provoca un impacto negativo al ambiente.

Por tanto, la fertilización química ha sido apoyada fuertemente por los técnicos, sin embargo, no han considerado las propiedades y características del suelo para optimizar la eficiencia y manejo sustentable de los fertilizantes. Correndo *et al.* (2015) establece que se deben de considerar los aspectos productivos, económicos, sociales y ambientales para desarrollar una mejor recomendación de fertilización por ser este un concepto muy complejo. Normalmente, los técnicos solo utilizan indicadores que estiman la eficiencia de los nutrimentos por lo práctico para realizar cálculos económicos (Salvagiotti *et al.*, 2011) descuidando los demás aspectos.

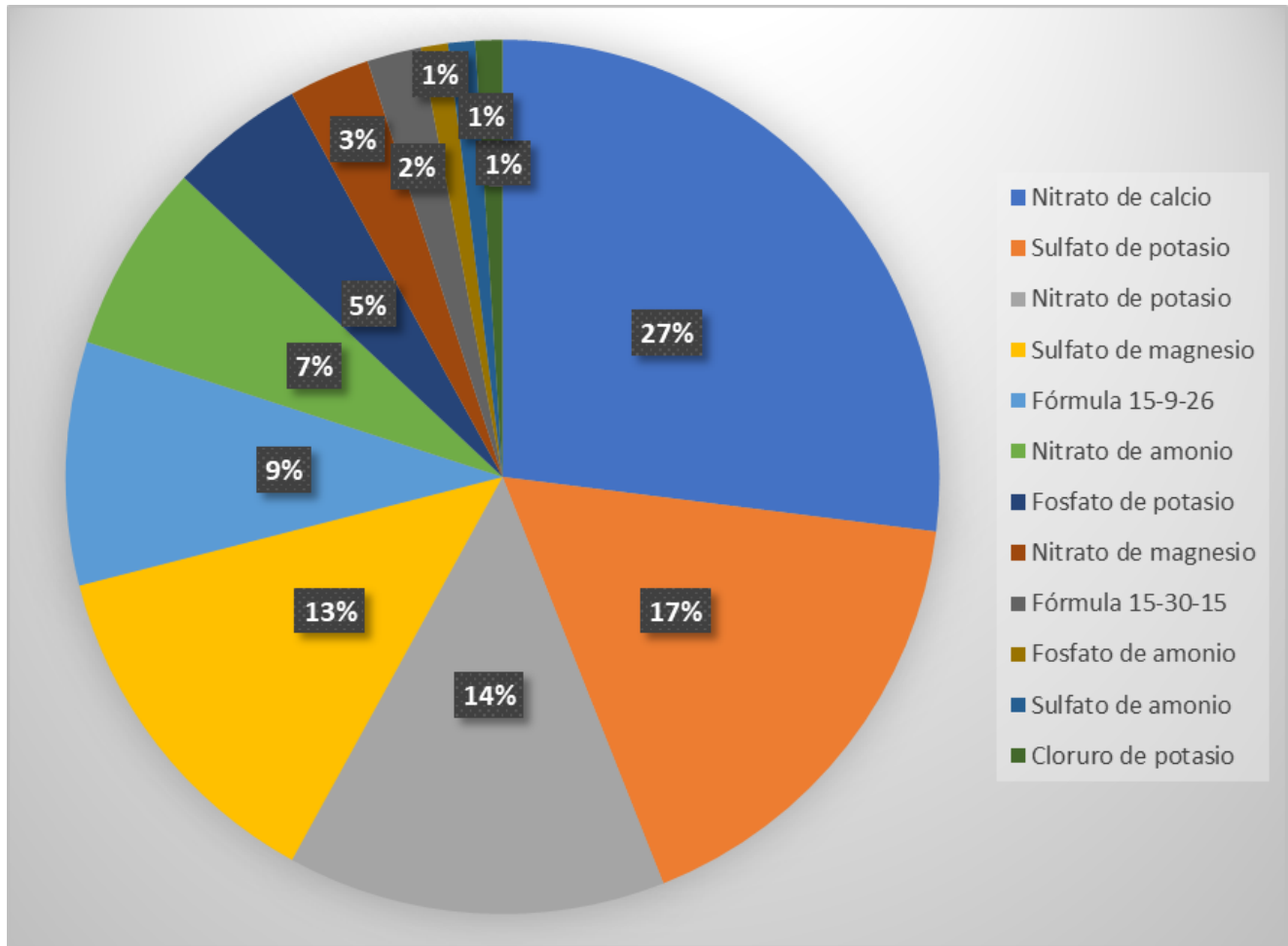


Figura 7. Porcentaje de uso de los diferentes fertilizantes por productores en agricultura protegida.

5.2 Aportación de los nutrimentos por el suelo y eficiencia de recuperación del fertilizante

De acuerdo con Godoy *et al.*, (2009) el cultivo de jitomate demanda un requerimiento interno de 2.1 kg de N, 0.7 kg de P_2O_5 , 4.4 kg de K_2O , 2.3 de Ca y 0.4 kg de Mg por tonelada de fruto cosechada, resultados obtenidos de un experimento en invernadero en Celaya, Guanajuato, y cultivado en suelo a 20 racimos de cosecha el rendimiento comercial lo clasifiqué en frutos pequeños menores de 7 cm, medianos de 7.1 a 8.5 cm, grandes mayores a 8.6 cm y no comerciales que incluyo a frutos con defectos comerciales (deformaciones, pudrición apical, daño por patógenos). La extracción unitaria la obtuve de dividir la cantidad extraída del nutrimento entre la producción total de fruta fresca y se expresó en $kg\ Mg^{-1}$.

Para el caso de la fertilización con nitrógeno en el Cuadro 1 se muestra el balance de entradas y salidas, donde el 70% de los productores aplican niveles superiores a lo óptimo, y el 30% no logra suministrar la cantidad suficiente que su cultivo en función de su rendimiento necesita, desde el punto de vista económico y tomado los precios actuales de los fertilizantes, los productores están gastando más de lo que en verdad deberían, pudiendo reducir sus costos si fertilizaran adecuadamente. Puede notarse que los productores de las muestras 2, 13, 23, 26 y 29, las cantidades del nitrógeno residual es mayor a la extracción por el cultivo, por tanto, el plan de nutrición de su cultivo de estos productores debe revisar sus aportaciones para ajustar sus dosis y no fertilizar en cantidades superiores a lo que el cultivo requiere.

Analizando el balance de las aportaciones y el consumo por el cultivo, se muestra como la cantidad de fósforo (Cuadro 2) y potasio (Cuadro 3) que los productores han aplicado más el suministro del suelo, supera por mucho la cantidad que sus cultivos demandan, la mayor aportación es debida al suministro del suelo, posiblemente a la acumulación que este ha sufrido producto de la fertilización a lo largo de los años, analizando estos datos y tomando en cuenta los rendimientos de los productores, se puede con seguridad hacer una disminución de la fertilización con fósforo y potasio sin que haya una disminución en el rendimiento, y para algunos casos el suministro es más que suficiente se podría suspender la fertilización sin problema alguno.

Cuadro 1. Balance de entradas y salidas de nitrógeno en un sistema de agricultura protegida.

Productor	NRF	NRC	ND	ENC	NR
kg ha ⁻¹					
1	766	56	822	504	318
2	1010	22	1032	420	612
3	180	27	207	462	-255
4	1182	32	1214	630	584
5	756	67	824	630	194
6	260	15	275	756	-481
7	432	69	501	840	-339
8	898	12	910	504	406
9	668	26	694	924	-230
10	1443	27	1470	840	630
11	876	24	899	672	227
12	672	29	700	357	343
13	1223	49	1272	630	642
14	346	28	374	420	-46
15	791	96	888	630	258
16	1122	9	1131	840	291
17	804	75	879	756	123
18	407	134	541	294	247
19	478	28	506	756	-250
20	678	39	718	756	-39
21	301	32	334	714	-380
22	648	179	826	462	364
23	1328	361	1689	756	933
24	313	220	532	672	-140
25	777	181	958	840	118
26	964	320	1284	462	822
27	855	10	864	630	234
28	910	74	984	630	354
29	1311	9	1319	630	689
30	889	306	1195	672	523

N_{RF}: Nitrógeno recuperado del fertilizante, N_{AC}: Nitrógeno recuperado por el cultivo, N_D: Nitrógeno disponible, N_{ENC}: Extracción de nitrógeno por el cultivo, N_R: Nitrógeno residual.

Cuadro 2. Balance de entradas y salidas de fósforo en un sistema de agricultura protegida.

Productor	P₂O₅RF	P₂O₅RC	P₂O₅D	E_{PC}	P₂O₅R
kg ha ⁻¹					
1	129	1667	1796	168	1628
2	94	872	966	140	826
3	38	1392	1430	154	1276
4	97	453	549	210	339
5	46	323	369	210	159
6	24	140	164	252	-88
7	111	198	309	280	29
8	29	597	626	168	458
9	21	265	286	308	-22
10	89	684	773	280	493
11	34	554	588	224	364
12	42	262	304	119	185
13	115	640	755	210	545
14	24	337	361	140	221
15	77	282	359	210	149
16	126	568	694	280	414
17	260	742	1002	252	750
18	30	944	974	98	876
19	0	279	279	252	27
20	20	380	400	252	148
21	8	424	432	238	194
22	74	510	585	154	431
23	54	496	550	252	298
24	48	380	428	224	204
25	33	380	414	280	134
26	34	496	529	154	375
27	73	597	670	210	460
28	29	944	973	210	763
29	38	727	765	210	555
30	31	742	773	224	549

P₂O₅RF: Fósforo recuperado del fertilizante, P₂O₅RC: Fósforo recuperado por el cultivo, P₂O₅D: Fósforo disponible, P₂O₅NC: Extracción de fósforo por el cultivo, P₂O₅R: Fósforo residual.

Cuadro 3. Balance de entradas y salidas de potasio en un sistema de agricultura protegida.

Productor	K ₂ O _{RF}	K ₂ O _{RC}	K ₂ O _D	E _{KC}	K ₂ O _R
kg ha ⁻¹					
1	3368	3299	6666	168	6498
2	2402	1374	3776	140	3636
3	763	764	1527	154	1373
4	1710	734	2444	210	2234
5	1703	654	2356	210	2146
6	536	185	721	252	469
7	1199	691	1890	280	1610
8	1021	1374	2395	168	2227
9	816	1205	2021	308	1713
10	2304	1315	3619	280	3339
11	1615	911	2526	224	2302
12	546	734	1280	119	1161
13	2052	970	3022	210	2812
14	385	1982	2367	140	2227
15	949	1206	2154	210	1944
16	1188	1172	2359	280	2079
17	3006	2674	5680	252	5428
18	762	1278	2040	98	1942
19	1261	599	1860	252	1608
20	499	566	1064	252	812
21	720	1239	1959	238	1721
22	1716	3152	4868	154	4714
23	1423	1646	3069	252	2817
24	845	2283	3128	224	2904
25	1335	835	2171	280	1891
26	923	911	1834	154	1680
27	1070	1172	2242	210	2032
28	864	700	1564	210	1354
29	920	700	1620	210	1410
30	1271	1003	2275	224	2051

K₂O_{AF}: Potasio aplicado a través de fertilizantes, K₂O_{RF}: Potasio recuperado del fertilizante, K_S: Potasio extractable en el suelo, K₂O_{RC}: Potasio recuperado por el cultivo, K₂O_D: Potasio disponible, E_{KC}: Extracción de potasio por el cultivo, K₂O_R: Potasio residual.

Sin embargo, existe un problema para poder realizar lo antes mencionado, y es la filosofía de pensar del productor, ya que él cree que si no aplica fertilizante va a tener poco rendimiento, sin darse cuenta, que los bajos rendimientos son debido a que aplican

cantidades mayores a las que su cultivo requiere, entonces surge la pregunta ¿Cómo aplicar la información de este estudio en beneficio de los agricultores?, algo que el autor ha aprendido por experiencia propia con productores, es que si logras convencer a alguno y se demuestra que funciona la solución, los demás se dan cuenta y por propia voluntad aplican lo mismo, ya que ellos también quieren obtener mejores rendimientos.

El principal cultivo producido en agricultura protegida es el jitomate (*Solanum Lycopersicum* L.) es muy posible que se haya adaptado este cultivo, por la imposición de las primeras empresas que vendían invernaderos, por ser ellos los primeros asesores de los productores iniciales, sumando a esto, los precios del mercado han sido atractivos para el productor, además aunque los rendimientos no alcanzan el potencial que este sistema ofrece, es suficiente para los productores, además por las condiciones climáticas que se cuenta, permite la producción de dos ciclos por año, cosa que no es posible en los cultivos a campo abierto.

El 86% de los productores se basa en apoyo técnico para su plan de nutrición de sus cultivos (Figura 8), sin embargo, habría que revisar la calidad de la capacitación que ofrecen los técnicos y sobre todo evaluar sus conocimientos y experiencia en temas de nutrición de cultivos, esto para ayudar a determinar en quien incurre el problema de aplicar la fertilización de manera inadecuada.

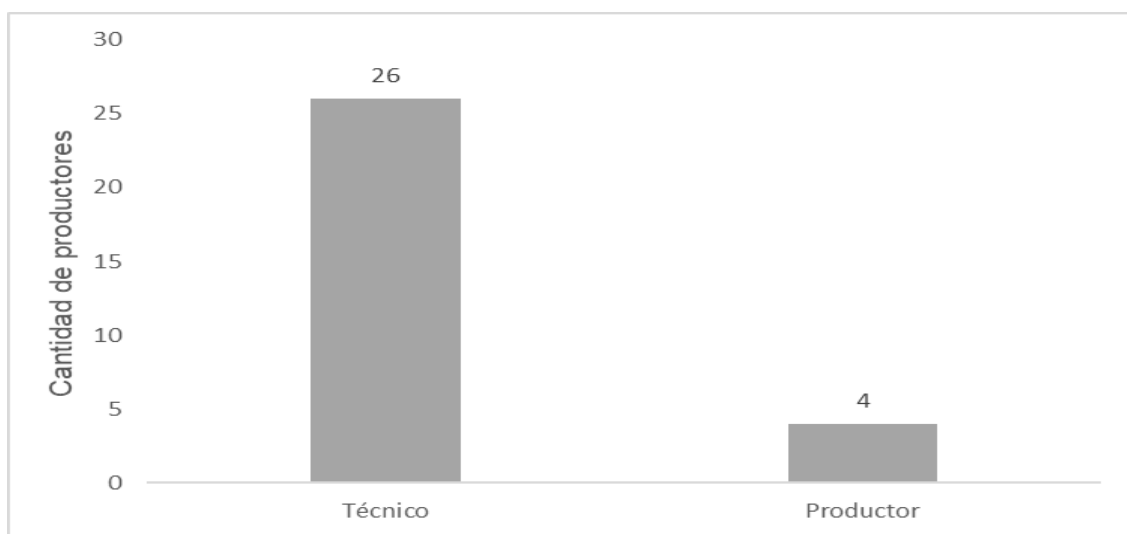


Figura 8. Cantidad de productores que elaboran su plan de nutrición de cultivos con asesoría técnica o ellos mismos.

Solo el 50% de los productores ha realizado análisis químico de suelo, de los análisis realizados por parte de los productores el 60% corresponden estudios de fertilidad y extracto de pasta saturada, el 40% de los análisis hechos corresponden solo a fertilidad de suelo. En cuanto a la frecuencia en que realizan los análisis, el 80% lo hace cada 2 años y únicamente el 20% lo realiza cada año. Cabe resaltar que los productores de Tetela de Ocampo, tienen dos ciclos de producción al año.

Con respecto a sus rendimientos (Figura 9), el promedio anual oscila en 30.3 4 kg m⁻², encontrando productores con un rendimiento de 14 y 17 4 kg m⁻² y productores con los máximos rendimientos entre 40 y 44 4 kg m⁻² los rendimientos solamente incluyen la producción comercial. Sin embargo, los rendimientos son bajos, si tomamos en cuenta que la media nacional de producción de jitomate en invernadero en suelo es de 56.4 kg m⁻² (SIAP, 2021), esto implica que ni los productores con el rendimiento más alto que fue de 44 4 kg m⁻² se encuentran en la media nacional, por tanto, se debe evaluar qué factores además de la fertilización están influyendo en estos bajos rendimientos.

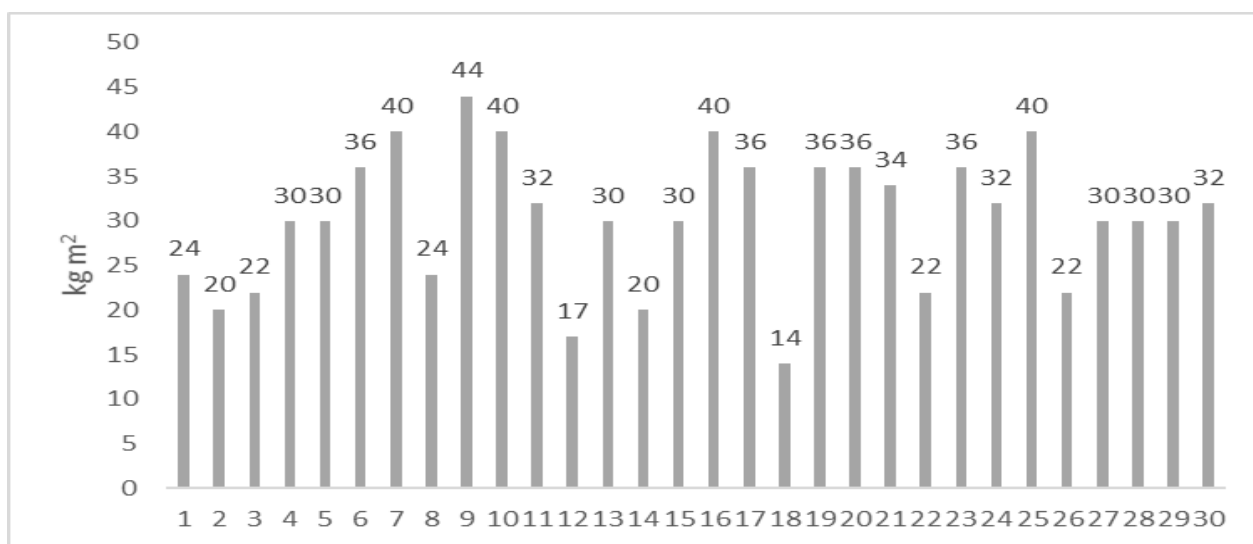


Figura 9. Producción en kg m² año de los productores de jitomate en agricultura protegida.

De acuerdo al criterio de los productores, el 60% argumenta que sus rendimientos han disminuido con los años, 30% ha mantenido sus rendimientos y solo un 10% ha logrado aumentar el rendimiento (Figura 10). El 73% de los productores no conoce los problemas de salinidad, nada más el 26% conoce el tipo de suelo que tiene.

Algunos productores realizan alguna enmienda a las camas antes de sembrar como acondicionamiento del suelo (Figura 11), esto incluye enmiendas orgánicas que pueden ser la incorporación de estiércoles, abono de monte, biochar, compost o cascara de semilla de pepita de calabaza. Las enmiendas químicas contemplan la incorporación de fertilizantes no solubles a las camas, entre ellos: superfosfato de calcio simple, fosfato diamónico y tripe 17-17-17. Las cantidades y frecuencia de aplicación son variadas en función del criterio del productor. El 70% de los productores realiza enmienda orgánica, 13% enmienda química, 10% realizan una combinación de ambas y el 7% no realiza ningún tipo de enmienda.

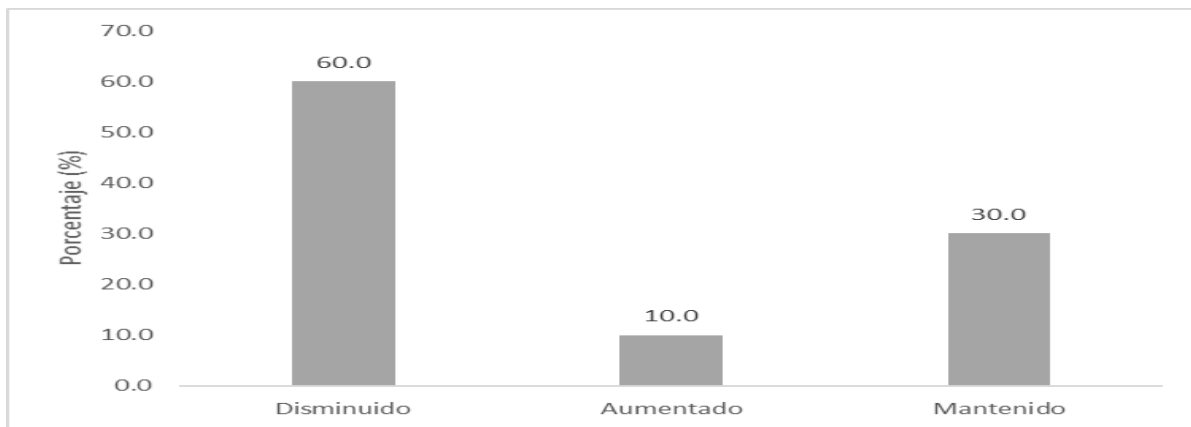


Figura 10. Tendencia del comportamiento del rendimiento del cultivo de jitomate en invernadero con los años.

Si bien, la fertilización de fondo es una herramienta útil para fertilizar, se tiene que hacer bajo un criterio en el que se aplique lo que necesita el suelo al tener una deficiencia o en función del requerimiento del cultivo, para evitar incurrir en aportaciones innecesarias, el manejo de los abonos orgánicos deben de estar dirigidas a efecto que se desea obtener en el suelo, ya que aunque todos los materiales orgánicos tienen un efecto positivo en la fertilidad del suelo, de acuerdo a su composición orgánica y mineral los efectos de cada uno van a ser diferentes, aspectos que no toma en cuenta el productor, solo aplica materia orgánica porque sabe que es beneficioso para el suelo.

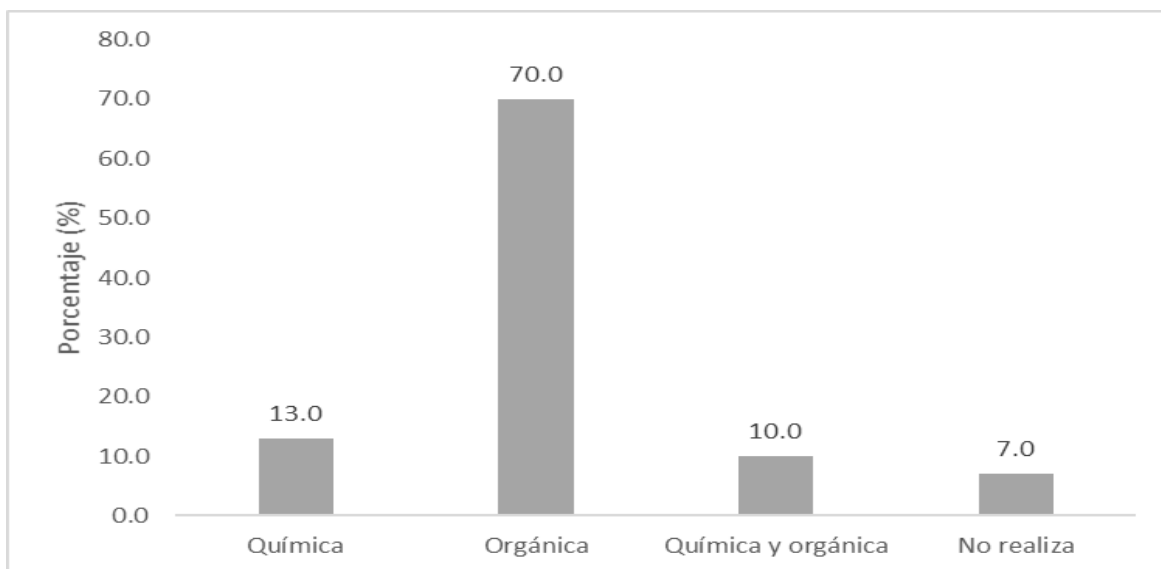


Figura 11. Tipos de enmiendas realizadas al suelo antes de sembrar.

5.3 Resultados del análisis químico del suelo

Las características y propiedades químicas del suelo en el sitio no cultivado, presenta bajas concentraciones de nutrimentos en comparación con suelos que han sido explotados en la producción intensiva de agricultura protegida (Cuadro 4). Lo que significa que no ha sido perturbado por la fertilización, y las concentraciones de nutrimentos tienen al equilibrio, los niveles de nutrimentos son considerablemente inferiores a los de suelos agrícolas, que han sufrido acumulación de estos.

La fertilización utilizada en los sistemas de fertirriego en los cultivos de agricultura protegida, ocasionan un incremento en la concentración de nutrientes en el suelo, producto de la aplicación constante y excesiva de insumos al aplicar cantidades superiores a las que se requieren, por parte de los productores, como lo demuestra Shin *et al.*, (2009), estudiando el comportamiento de la fertilización continua en campo abierto y en invernadero.

En donde la concentración de nutrimentos aumentó, además de la conductividad eléctrica y cambios en el pH del suelo, en si los fertilizantes amoniacales no son el problema de la acidez, sino los procesos producidos por la oxidación del amonio en el suelo, durante el proceso de nitrificación, el amonio se oxida a nitrito y luego a nitrato por

la acción de las bacterias nitrosomonas y nitrobacter, durante las reacciones de nitrificación y nitratación hay liberación de H^+ , el cual aumenta la acidez del medio, en este caso del suelo agrícola, también es en este proceso que ocurre la pérdida de nitrógeno como N_2O . La acidificación del suelo influye en la productividad de los cultivos, suelos con pH ácido presenta solubilidad del Al^{3+} y Mn^{2+} , elementos que en concentraciones elevadas es nocivo para el cultivo, también afecta en la disponibilidad de algunos nutrimentos esenciales como calcio, magnesio y hierro, limitando el rendimiento de los cultivos.

La totalidad de los suelos estudiados, muestran un incremento en la concentración de nutrimentos comprado con el suelo sin cultivar, los niveles de fósforo presentan una tendencia de acumulación, resultado de los remanentes de aplicaciones anteriores (Figura 12), resultados similares en el incremento en la concentración de fósforo fueron reportados por McLaughlin *et al.*, (2011), en suelos de Australia donde la aplicación de fertilizantes fosfatados ha ocasionado incremento en los niveles de fósforo inorgánico.

Cuadro 4. Resultados del análisis químico y físico de los suelos estudiados. (SC: Suelo sin cultivar, 1,2,3,4... 30; Número correspondiente al etiquetado de cada muestra)

Muestra	pH	CE	MO	NT	NO ₃	NH ₄	P	Arena	Limo	Arcilla	Textura
		dS m ⁻¹	%	%	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	%	%	%	
SC	6.09	0.20	1.3	0.10	4	4	8	25	16	59	Arcilloso
1	6.69	2.70	6.5	0.18	22	4	560	36	39	25	Franco
2	5.69	1.38	1.8	0.13	9	7	293	33	30	37	Franco arcilloso
3	5.80	1.65	5.0	0.14	11	4	468	34	41	25	Franco
4	4.92	1.10	1.1	0.11	13	5	152	33	37	29	Franco arcilloso
5	4.18	3.48	1.6	0.11	27	5	108	39	36	25	Franco
6	6.21	0.58	1.4	0.10	6	2	47	37	32	31	Franco arcilloso
7	6.18	2.80	1.3	0.10	28	6	67	35	39	25	Franco
8	6.70	0.60	6.0	0.03	5	4	201	31	31	37	Franco arcilloso
9	5.98	1.75	4.1	0.13	11	4	89	37	38	25	Franco
10	5.87	1.10	5.8	0.28	11	3	230	35	46	19	Franco
11	6.49	1.50	3.1	0.12	9	4	186	31	41	27	Franco arcilloso
12	4.71	1.20	4.4	0.11	12	4	88	29	39	31	Franco arcilloso
13	4.39	2.83	2.7	0.18	20	8	215	39	31	29	Franco arcilloso
14	7.83	0.95	4.8	0.05	11	2	113	59	29	11	Franco arenoso
15	5.96	3.48	1.2	0.12	39	12	95	29	40	31	Franco arcilloso
16	6.38	1.33	1.6	0.09	4	5	191	31	41	29	Franco arcilloso
17	6.77	4.95	2.6	0.14	30	9	249	43	32	25	Franco
18	6.82	5.50	2.1	0.16	54	9	317	45	32	23	Franco
19	5.99	0.83	2.7	0.16	11	6	94	29	37	35	Franco arcilloso
20	5.88	0.70	4.1	0.14	16	9	128	31	28	41	Arcilloso
21	5.96	1.45	3.5	0.06	13	3	142	37	29	35	Franco arcilloso
22	6.88	7.73	2.7	0.19	72	2	171	49	31	21	Franco
23	6.28	10.98	2.4	0.21	144	5	167	45	36	19	Franco
24	5.74	7.53	2.3	0.20	88	7	128	33	34	33	Franco
25	5.63	6.35	2.5	0.21	72	8	128	35	24	41	Arcilloso
26	5.69	7.98	3.3	0.25	128	6	167	49	24	27	Franco arcilloso
27	7.74	0.60	2.5	0.15	4	4	201	31	40	29	Franco arenoso
28	4.79	4.78	3.3	0.21	29	9	317	29	24	47	Arcilloso
29	5.13	1.95	2.6	0.15	4	1	244	25	20	55	Arcilloso
30	4.68	9.68	2.4	0.20	123	9	249	33	38	29	Franco arcilloso

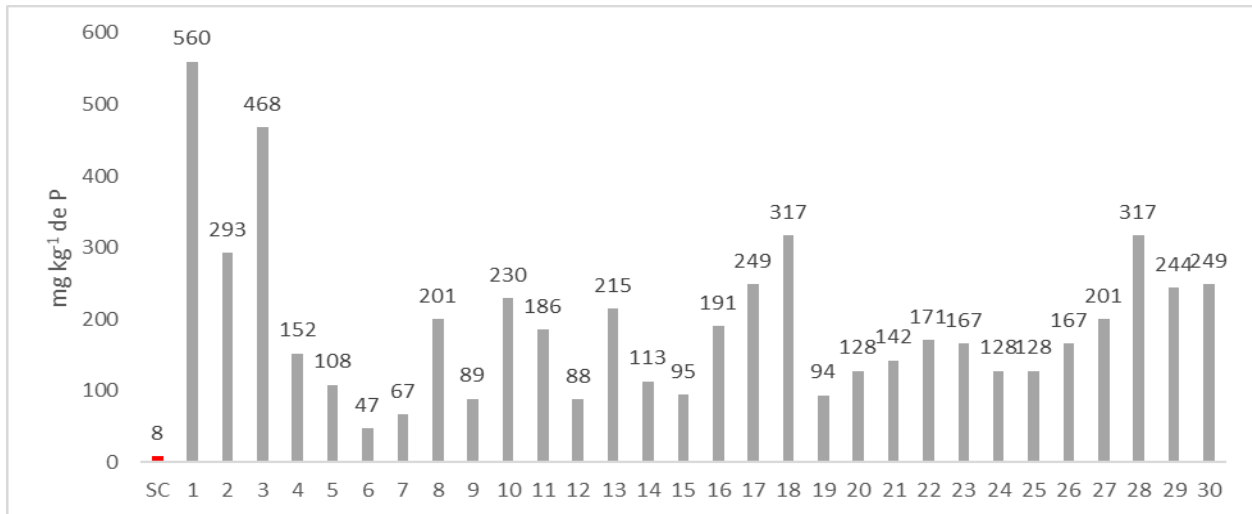


Figura 12. Niveles de P extractable en los suelos en invernadero. (SC: Suelo sin cultivar; 1,2,3,4...30: Número correspondiente al etiquetado de cada productor).

Como se observa en la Figura 11, se encontraron niveles de fósforo inorgánico de 468 y 560 mg kg⁻¹ respectivamente, lo cual puede explicarse por la concentración de materia orgánica que es de 6.4% y 4.9% respectivamente, por lo que es muy posible que estos productores hayan incorporado materia orgánica en el suelo que ha provocado que el fósforo se haya incrementado considerablemente por la mineralización de la materia orgánica, en comparación con el suelo sin cultivar que presenta una concentración de fósforo de solo 8 mg kg⁻¹, esto representa una concentración de 70 y 58 veces más fósforo en suelos de invernaderos y un contenido de materia orgánica de 1.3%.

De acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, establece un nivel medio de 5.5 a 11 mg kg⁻¹ de fósforo y alto de >11 mg kg⁻¹, por tanto, el 100% de los suelos estudiados presentan niveles altos y únicamente el suelo sin cultivar presenta un valor medio.

Los niveles de nitrógeno inorgánico, en la mayoría de suelos no presentan un incremento significativo con relación a las cantidades excesivas que aportan los productores (Figura 13), solamente el 20% de los suelos se encuentran en niveles muy altos (>60 mg kg⁻¹ de N inorgánico) un 23% se encuentra en niveles medios (20- 40 mg kg⁻¹ de N inorgánico) y un 43% en niveles bajos a muy bajos.

En China Ju *et al.*, (2011) evaluaron la eficiencia de aplicación de nitrógeno en cultivo de jitomate en invernadero, solo se recuperó un 18% del fertilizante y entre el 71% y 86% de las pérdidas fue por lixiviación, esto ayuda a explicar, que si bien, los niveles de N son altos, no tienen una acumulación significativa en función de las cantidades elevadas de fertilizantes nitrogenados aplicados. La lixiviación de nitratos es considerada la principal vía de pérdida de nitrógeno al agua (Min *et al.*, 2012). En la zona de estudio representa un problema, donde del total de nitrógeno aplicado 86% es en fuente de nitratos y 14% en amonio, aunque este último, después de unos días, una parte se oxida y se convierte en nitrato. Si bien, el productor utiliza más la fuente de nitratos para evitar pérdidas de volatilización del amoniaco, debido a que el nitrato no se transforma en amoniaco, evitando la pérdida de nitrógeno inorgánico, pero se incurre en otro problema, que es la lixiviación de nitratos al medio.

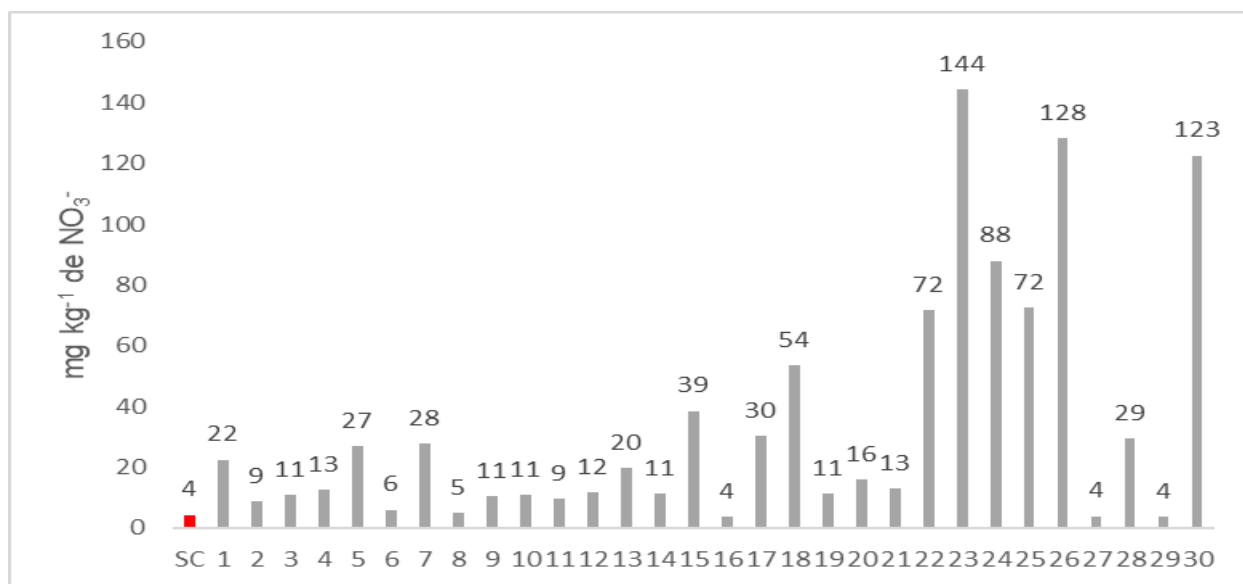


Figura 13. Niveles de nitrógeno extractable en suelos en agricultura protegida. (SC: Suelo sin cultivar; 1,2,3,4...30: Número correspondiente al etiquetado de cada productor).

De acuerdo a la interpretación de resultados de la clasificación de pH del suelo de la Norma Oficial Mexicana. El 76% de los suelos analizados presenta problemas de acidez, como se muestra en la Figura 14, de estos el 56% de los suelos presenta acidez moderada (pH 5.1-6.5), 20% de los suelos tiene un pH fuertemente ácido, encontrando valores de acidez de pH 4.18. Solo el 16% de los productores tienen valores de pH neutro (pH 6.6 – 7.3), lo que no ocasiona problemas en la disponibilidad de nutrientes en el

suelo, pues la presencia de aluminio soluble, puede inhibir la división celular de las raíces, restringiendo la absorción de nutrientes, igualmente las concentraciones de aluminio pueden perjudicar la actividad de los microorganismos del suelo responsables de la descomposición de la materia orgánica, la nitrificación, entre otros procesos (Osorio *et al.*, 2012).

En la zona de estudio, el principal cultivo en agricultura protegida es el jitomate, un cultivo que demanda grandes cantidades de calcio y potasio, la absorción en exceso de estos cationes, provoca una liberación neta de protones para mantener el equilibrio químico en la solución del suelo (Marschner, 2012; Cap. 14.4) lo que ha contribuido a la acidez del suelo. El uso prolongado de fertilizantes amónicos en cultivo de trigo en Oklahoma, ha causado una reducción en el pH de los suelos a largo plazo (Schroder *et al.*, 2011). En China la fertilización de hortalizas ha ocasionado una acidificación del suelo con valores de pH extremadamente ácidos por debajo de 5.0, y una acumulación de nitrógeno y fósforo, lo que representa un potencial problema de contaminación de cuerpos acuáticos (Guo *et al.*, 2010; Liang *et al.*, 2013). Para que se dé la absorción de nutrientes las raíces liberan protones a la solución del suelo, cuando la raíz absorbe NH_4 libera H^+ , cuando absorbe NO_3 libera OH^- , los cambios en el pH afectan la solubilidad de nutrientes como calcio, fósforo, azufre y molibdeno, causando deficiencias en los cultivos.

El proceso de acidificación del suelo por la aplicación de fertilizantes nitrogenados, no tiene en todos los suelos un efecto significativo en la acidez, como lo demuestra Vašák *et al.*, (2015) en la aplicación experimental de fertilizantes a largo plazo en diferentes suelos de República Checa, observando mínimas en la diferencia de pH de todos los tratamientos, esto se debe a la alta capacidad buffer de los suelos, para resistir los cambios a la acidez.

De acuerdo con los datos obtenidos de la encuesta, el 80% de los productores aplican algún tipo de materia orgánica al suelo antes de la siembra, esto se ve reflejado en la concentración de materia orgánica en los suelos, el 90% de los productores tienen un nivel superior al suelo sin cultivar (1.34%) y solo el 10% de ellos presenta niveles inferiores. Zak (2017), en un experimento a 20 años donde aplico nitrógeno de manera

constante, tuvo un efecto en el incremento de materia orgánica del suelo debido a que aumento la relación C/N lo que redujo la mineralización de la materia orgánica, es posible que en los suelos estudiados haya pasado el mismo proceso, debido a las cantidades elevadas y constantes de fertilizantes nitrogenados.

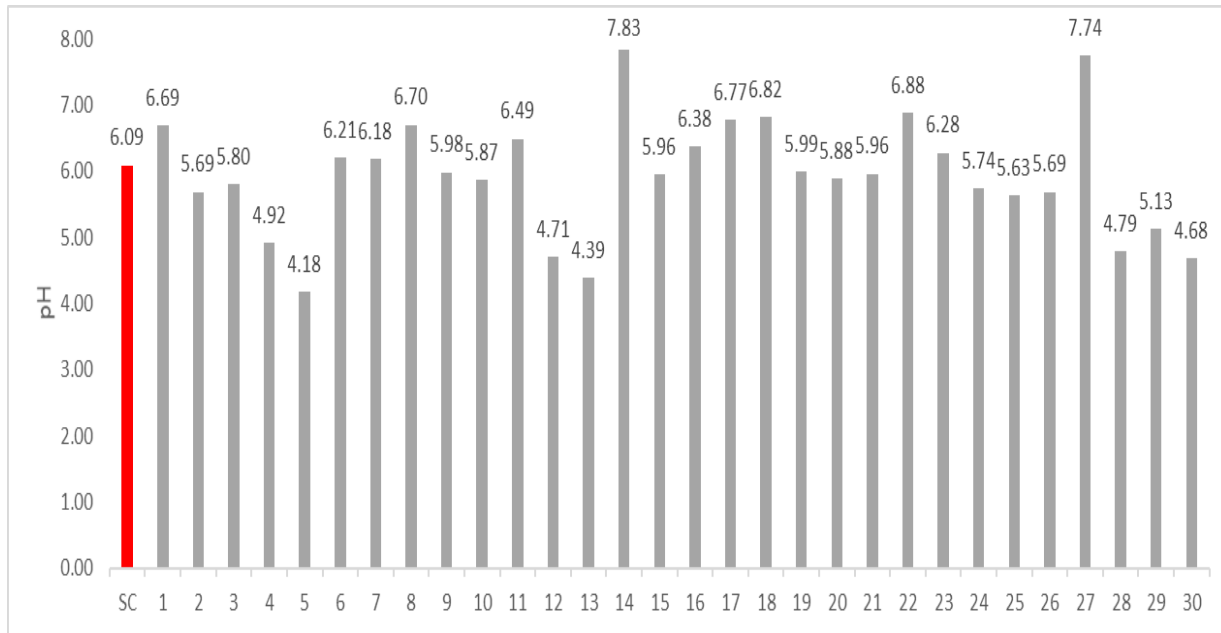


Figura 14. Valores de pH en suelos agrícolas en agricultura protegida. (SC: Suelo sin cultivar; 1,2,3,4...30: Número correspondiente al etiquetado de cada productor).

Los microorganismos requieren una relación C/N de 8:1, para poder realizar los procesos de mineralización que es el proceso mediante el cual los microorganismos transforman al material orgánico en nutrientes minerales inorgánicos, un aumento en el contenido de C provoca una relación C/N más alta por la presencia de bajo contenido de nitrógeno, por tanto, los microorganismos no logran obtener la energía necesaria para sus procesos metabólicos. La incorporación de abonos orgánicos, tiene efectos en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (Esmaeilzadeh y Ahangar, 2014), pero se debe tener cuidado con la incorporación de abonos sin un proceso previo de compostaje, que puede ocasionar problemas fitosanitarios, como problemas fungosos en la raíz.

Yan *et al.*, (2016) en suelos en invernadero demostró que la aplicación de estiércol contribuyó a una acumulación de fósforo inorgánico, lo que ayuda a explicar las altas

concentraciones de fósforo extractable en los suelos analizados. Los niveles de materia orgánica en su mayoría son superiores al suelo sin tartar (1.34%) como se muestra en la Figura 15, aunque no es suficiente el nivel de materia orgánica para los suelos en función de su textura, debido a que la materia orgánica se adhiere a la arcilla, proceso que ocurre cuando la materia orgánica es adsorbida sobre la superficie de las partículas de arcilla, por tanto, suelos con mayor contenido de arcilla retienen más materia orgánica y hay una mejor protección a la degradación por los microorganismos

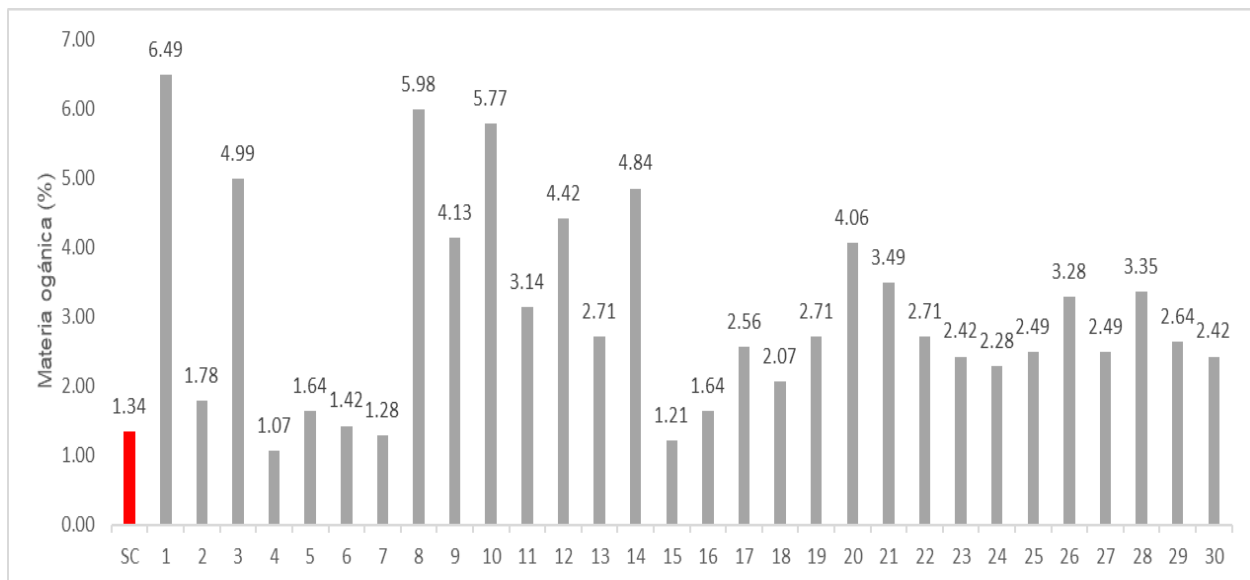


Figura 15. Niveles de materia orgánica en suelos en agricultura protegida. (SC: Suelo sin cultivar; 1,2,3,4...30: Número correspondiente al etiquetado de cada productor).

Basándose en los datos de la Norma Oficial Mexicana para la fertilidad de suelos, el 60% de los suelos se encuentra dentro del rango medio del contenido de materia orgánica (1.6% - 3.5%), y solo el 13% contiene niveles bajos de materia orgánica, aunque la mayoría de productores aplican constantemente algún tipo de abono orgánico, no ha sido suficiente para tener niveles altos.

Sin embargo, Rasmussen *et al.*, (2018), cuantifico otros factores fisicoquímicos además de la arcilla, que controlan la estabilización de la materia orgánica en el suelo, en su estudio mostró que el contenido de calcio intercambiable predijo fuertemente el contenido de materia orgánica en el suelo en suelos alcalinos y en suelos ácidos lo hizo los óxidos

de hierro y aluminio. Por tanto, el clima y la acidez juegan un papel importante en la estabilización de materia orgánica de los suelos, la temperatura y la humedad son factores intrínsecos en los procesos biológicos, el también pH afecta en el desarrollo de los microorganismos, si no es el adecuado afecta negativamente.

Un suelo que contiene un alto contenido de sales que perjudica su productividad se llama suelo salino (Yan *et al.*, 2015) los efectos negativos en el suelo son varios: afecta el potencial osmótico, reduce la actividad y la biomasa microbiana (Setia *et al.*, 2011), provoca sodicidad, dispersión de agregados, compactación, entre otros, los suelos arcillosos por tener mayor capacidad de intercambio catiónico, tienden a acumular más sales. La conductividad eléctrica presenta variabilidad en los resultados, en los resultados del análisis químico se muestra la acumulación de nutrimentos, dado que todos los suelos estudiados presentan valores superiores de CE en comparación al suelo sin cultivar, encontrando que el 40% de los suelos se encuentran en valores con efectos moderadamente salinos, salino y fuertemente salino de acuerdo a la clasificación de la Norma de fertilidad de suelos. Si bien, esto es debido a la acumulación de sales por la aplicación de fertilizantes por los productores, hay otros factores que incurren es este proceso, como lo es la aplicación de diferentes abonos orgánicos. Azeez y Averbek (2012) aplicaron diferentes abonos de animales y estudiaron su efecto en el suelo, los abonos de aves y caprino presentaron una mayor capacidad de incremento de la CE en el suelo. Los abonos de aves tienen una tasa de mineralización aproximadamente de 0.9, lo que implica que en el primer año el 90% del material orgánico bajo condiciones adecuadas, se mineraliza, abonos como el bocashi, durante su proceso de fermentación hay pérdida de C por la respiración, que puede ser hasta el 70% del carbono orgánico, regularmente este tipo de abono tiene una relación C/N final menor a 20, por lo que el proceso de mineralización es muy rápido, incorporando los nutrientes mineralizados a la solución del suelo, por tanto, estos abonos deberían ser considerados como fertilizantes orgánicos. Es posible que la aplicación de diferentes abonos orgánicos por los productores haya influido también en el incremento de la CE en los suelos estudiados.

En el Cuadro 5 se puede observar las concentraciones de calcio, magnesio, sodio y potasio en la fracción intercambiable y soluble, se puede notar para el caso de sodio, esto debido posiblemente a que se ha solubilizado la reserva en la fracción intercambiable, pasando a la solución del suelo, debido a las actividades agrícolas, el agua llega a contener concentraciones importantes en sodio, por lo que se debería analizar la calidad del agua que utilizan los productores, los abonos orgánicos, dependiendo del material, contiene concentraciones importantes de sodio, por tanto, la incorporación de estos también influye en la acumulación de sodio en la fracción soluble. Se observa que, en el suelo sin cultivar, el contenido de sodio en la fracción soluble no es superior a la fracción intercambiable.

Se puede observar también que los suelos con las concentraciones más altas de sodio soluble (mayor a $2 \text{ cMol (+) kg}^{-1}$) presentan también los niveles de CE más altos, ya que existe una correlación positiva entre la CE y la concentración de sodio soluble (Bosch *et al.*, 2012), la conductividad eléctrica es la capacidad de los iones de conducir electricidad a través de ellos, el sodio tiene una mayor capacidad de conducir la electricidad que otros iones como el calcio y potasio. En la totalidad de los suelos la concentración de sodio soluble fue mayor a la fracción soluble del suelo sin cultivar ($0.3 \text{ cMol (+) kg}^{-1}$), no obstante, en la fracción intercambiable solo el 60% presento niveles superiores al suelo sin cultivar ($0.6 \text{ cMol (+) kg}^{-1}$) y el 40% presento valores iguales e inferiores.

El potasio presenta un comportamiento diferente, la fracción intercambiable es mayor que la fracción soluble, incluyendo al suelo sin cultivar, la concentración de potasio soluble e intercambiable están relacionados con las propiedades del suelo, en función del tipo y contenido de arcilla (Rodríguez, 1993). Los suelos con mayor contenido de arcilla presentan mayor capacidad de amortiguamiento de potasio (cK) que es el equilibrio entre K_s y K_i (Bugarín *et al.*, 2007), suelos con cK mayor contienen la mayor concentración de potasio intercambiable que en la solución del suelo, por tanto, esto explica por qué el contenido en la fracción intercambiable es superior a la intercambiable.

Cuadro 5. Concentraciones de bases intercambiables y solubles en suelos explotados en agricultura protegida. (SC: Suelo sin cultivar, 1,2,3,4...30: Número correspondiente al etiquetado de cada productor)

Muestra	CE	Bases Intercambiables				Bases Solubles			
		Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺
	dS m ⁻¹	-----cMol (+) kg ⁻¹ -----				-----cMol (+) kg ⁻¹ -----			
SC	0.20	24.8	42.6	1.0	0.6	2.0	3.3	0.4	0.3
1	2.70	22.1	28.3	5.9	1.4	1.3	4.3	3.4	1.1
2	1.38	21.1	25.2	2.7	0.5	0.9	4.0	0.9	1.2
3	1.65	24.3	24.4	1.4	1.0	1.7	1.6	1.5	0.5
4	1.10	21.7	20.1	1.4	0.3	1.1	3.9	1.1	0.4
5	3.48	21.4	22.5	1.2	0.4	3.3	8.1	1.2	0.5
6	0.58	22.7	24.2	0.4	0.4	1.7	2.6	0.3	0.4
7	2.80	23.2	29.0	1.2	0.7	3.9	8.6	0.8	1.0
8	0.60	23.7	23.1	2.7	0.4	1.5	3.7	1.2	0.5
9	1.75	22.3	24.5	2.1	0.8	2.0	3.7	1.3	0.9
10	1.10	21.5	36.3	2.3	0.6	0.9	5.8	1.3	0.7
11	1.50	20.9	29.1	1.6	0.4	2.0	3.7	1.1	0.5
12	1.20	19.6	25.2	1.4	0.4	0.9	3.4	0.9	0.5
13	2.83	20.4	30.9	1.9	0.8	2.1	4.7	1.2	1.1
14	0.95	23.1	39.0	3.2	1.1	3.7	0.7	1.1	1.3
15	3.48	24.4	35.7	2.3	1.0	3.1	0.7	1.1	1.3
16	1.33	21.8	32.6	2.3	0.4	1.3	3.2	1.4	0.4
17	4.95	21.6	35.1	4.7	0.7	6.4	1.7	3.0	1.0
18	5.50	18.2	32.4	2.3	0.8	8.5	1.9	2.3	1.3
19	0.83	21.9	32.7	1.2	0.4	2.1	4.0	0.7	0.4
20	0.70	20.7	36.9	1.1	0.6	1.6	4.1	0.7	0.7
21	1.45	19.2	38.3	2.4	0.7	1.4	3.2	1.3	0.9
22	7.73	19.5	34.9	5.6	1.3	10.0	28.9	4.2	2.0
23	10.98	17.5	37.0	2.9	1.8	11.8	36.9	2.1	2.8
24	7.53	19.3	37.5	4.4	1.8	6.6	26.6	2.7	3.0
25	6.35	15.3	37.3	1.6	1.5	7.9	21.3	0.8	2.0
26	7.98	17.1	39.0	1.6	1.5	4.9	15.8	1.0	2.8
27	0.60	19.6	35.7	2.3	0.6	2.1	2.6	1.1	0.7
28	4.78	23.6	36.2	1.4	1.4	5.9	16.4	0.5	1.8
29	1.95	16.1	35.3	1.4	1.2	2.7	7.9	0.6	1.3
30	9.68	20.0	35.7	1.9	1.9	7.7	36.4	1.6	3.2

De acuerdo con los rangos de interpretación de bases intercambiables de la NOM-021-RECNAT-2000, todos los suelos incluyendo al suelo sin cultivar presenta niveles altos de todas las bases intercambiables, esto puede explicarse al contenido de arcilla de los suelos, ya que ahí se encuentran los sitios de intercambio que retienen por fuerzas

electrostáticas a los cationes (Pérez *et al.*, 2017), provocando la acumulación debida a los fertilizantes.

Las concentraciones de los cationes calcio, magnesio y potasio, en los diferentes suelos estudiados representan un nivel suficiente para el cultivo de jitomate, los fertilizantes en los últimos años han tenido un incremento en los precios, lo que ha hecho que los costos de producción se eleven para los productores, razón por lo cual, con base en este estudio, se deben aprovechar los nutrimentos acumulados en el suelo, a lo largo de estos años, en beneficio de la economía del productor.

En este estudio se verifica que a medida que aumentan los niveles de nutrimentos por la aplicación de fertilizantes (Cuadro 1 a 3), hay una disminución en la respuesta de crecimiento de la producción, siendo esto compatible con la ley de los incrementos decrecientes de Mitscherlichs (Ferreira *et al.*, 2017).

En las áreas sin actividad agrícola, las sales solubles representan valores de 0.2 dS m^{-1} , pero en 53% de las zonas cultivadas varía entre 0.5 y 2.5 dS m^{-1} y en 47% supera los 3.0 dS m^{-1} que, según Sánchez-González *et al.* (2014), esto ya podría afectar la productividad del jitomate. En la Figura 16 se presenta la tendencia entre la conductividad eléctrica y los cationes básicos en sus formas intercambiables y solubles. Las tendencias mostradas en la figura en discusión hacen evidente que hubo una estrecha asociación entre las especies en la solución del suelo y no con las de los sitios de intercambio, situación que es consistente con lo observado por Coitiño-López *et al.* (2015) quienes emplearon este tipo de comparaciones para caracterizar recursos agroecológicos. Lo relevante está en la abundancia de sales solubles en la solución del suelo.

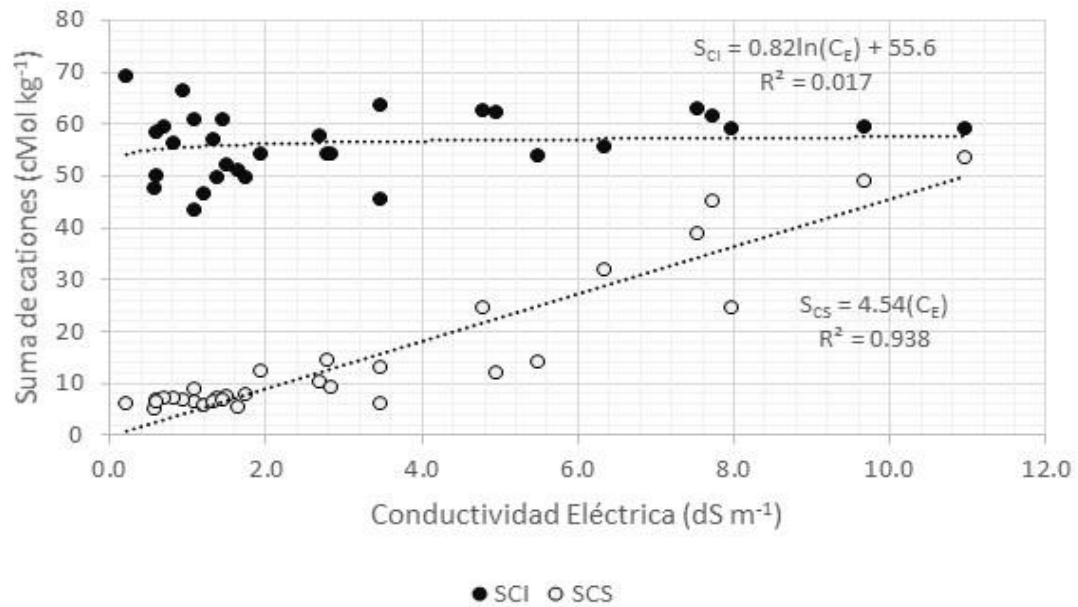


Figura 16. Tendencia de la conductividad eléctrica (CE) con la suma de los cationes básicos en su forma intercambiable (SCI) y soluble (SCS), de los suelos colectados en invernaderos de Tetela de Ocampo, Puebla.

Finalmente, con la ayuda de algunos productores, se logró obtener información de análisis de algunos suelos estudiados, en el Cuadro 6, se hace una comparación del estado actual de los suelos y su estado anterior en un periodo que comprende de 6 meses hasta 2 años.

Se muestran los cambios en las propiedades químicas de los suelos por el manejo de la fertilización que los productores han sometido a sus suelos, se reflejan los cambios que han sufrido en pH, CE, nitratos, fósforo y bases intercambiables, solo la materia orgánica presenta un menor cambio en sus valores. Se observó una gran variación en los valores de nitratos por parte de los laboratorios comerciales, que reportan valores muy superiores al análisis del Colegio. También se muestra que en todos los casos la concentración de sodio aumentado con el tiempo.

Cuadro 6. Comparación de análisis químico en diferentes laboratorios de algunos suelos estudiados.

Muestra	Laboratorio	pH	CE	M.O	NO ₃	P	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺
			dS m ⁻¹	%	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	-----cMol (+) kg ⁻¹ -----			
3	Colpos	5.80	1.65	4.99	11	468	24.3	24.4	1.4	1.0
	Lab 1	5.26	13.10	2.10	1083	104	15.3	4.2	2.5	0.8
4	Colpos	4.92	1.10	1.07	13	152	21.7	20.1	1.4	0.3
	Lab 1	5.22	1.77	1.09	80	204	5.3	1.2	1.2	0.1
6	Colpos	6.21	0.58	1.42	6	47	22.7	24.2	0.4	0.4
	Lab 2	7.50	0.24	1.07	15	28	12.2	1.6	1.0	0.3
7	Colpos	6.18	2.80	1.28	28	67	23.2	29.0	1.2	0.7
	Lab 2	7.00	1.96	3.73	213	386	19.9	5.6	6.5	0.4
9	Colpos	5.98	1.75	4.13	11	89	22.3	24.5	2.1	0.8
	Lab 1	4.75	2.02	5.75	59	168	4.9	1.1	1.2	0.2
11	Colpos	6.49	1.50	3.14	9	186	20.9	29.1	1.6	0.4
	Lab 1	5.45	2.04	4.52	288	150	9.8	1.4	1.2	0.3
12	Colpos	4.71	1.20	4.42	12	88	19.6	25.2	1.4	0.4
	Lab 1	5.79	2.27	2.02	111	135	5.4	1.3	2.0	0.2
15	Colpos	5.96	3.48	1.21	39	95	24.4	35.7	2.3	1.0
	Lab 1	5.82	3.96	2.67	122	287	11.2	2.3	2.2	0.3
22	Colpos	6.88	7.73	2.71	72	171	19.5	34.9	5.6	1.3
	Lab 1	7.90	2.54	2.54	58	206	30.0	4.3	3.1	0.3
23	Colpos	6.28	10.98	2.42	144	167	17.5	37.0	2.9	1.8
	Lab 1	7.21	3.81	3.14	156	299	14.2	2.1	1.2	0.4
25	Colpos	5.63	6.35	2.49	72	128	15.3	37.3	1.6	1.5
	Lab 1	7.27	4.35	3.05	85	258	24.0	4.2	2.6	0.7
26	Colpos	5.69	7.98	3.28	128	167	17.1	39.0	1.6	1.5
	Lab 1	6.46	5.20	5.03	336	75	19.2	2.2	1.0	0.4
28	Colpos	4.79	4.78	3.35	29	317	23.6	36.2	1.4	1.4
	Lab 1	6.18	5.69	3.84	249	173	22.8	3.8	1.6	0.03
30	Colpos	4.68	9.68	2.42	123	249	20.0	35.7	1.9	1.9
	Lab 1	4.55	3.81	2.55	166	249	9.5	2.1	0.3	0.4

Lab 1 y Lab 2: Laboratorios comerciales en dónde los productores han realizado sus análisis de suelos.

Como se exhibe en el Cuadro 7, el análisis de componentes principales (C_P) muestra que los componentes C_{P1}, C_{P2}, y C_{P3}, explican el 75% de la variación de los datos, en el primer componente (C_{P1}) tiene asociaciones positivas con la conductividad eléctrica, nitratos y nitrógeno total, mostraron los mayores coeficientes, el segundo componentes (C_{P2}) presenta relación negativa con materia orgánica, fósforo extractable y potasio intercambiable, el tercer componente tiene asociación negativa con pH pero positiva con fósforo, por tanto, indica que este nutrimento está en función de pH del suelo (Suñer *et al.*, 2018).

Cuadro 7. Análisis de los valores y vectores propios de la matriz de correlación de componentes principales (C_p).

Valor propio	2.786	2.035	1.167	0.775	0.467	0.418	0.327	0.025
Proporción	0.348	0.254	0.146	0.097	0.058	0.052	0.041	0.003
Acumulada	0.348	0.603	0.749	0.845	0.904	0.956	0.997	1.000
Variable	C_{P1}	C_{P2}	C_{P3}	C_{P4}	C_{P5}	C_{P6}	C_{P7}	C_{P8}
pH	-0.16	-0.40	-0.58	0.20	-0.43	0.39	-0.31	0.00
CE (dS m ⁻¹)	0.57	-0.07	-0.18	-0.13	0.15	-0.18	-0.21	0.73
MO (%)	-0.18	-0.49	0.35	-0.27	-0.51	-0.52	-0.03	0.10
NT (%)	0.44	-0.15	0.32	-0.28	-0.30	0.61	0.39	-0.01
NO ₃ ⁻ (mg kg ⁻¹)	0.55	-0.04	-0.20	-0.24	-0.06	-0.21	-0.35	-0.66
NH ₄ ⁺ (mg kg ⁻¹)	0.33	0.23	0.16	0.77	-0.42	-0.20	0.07	-0.00
P (mg kg ⁻¹)	0.06	-0.47	0.50	0.33	0.40	0.21	-0.45	-0.06
K (cMol kg ⁻¹)	0.13	-0.55	-0.30	0.23	0.31	-0.21	0.61	-0.14

El análisis de correlación (Cuadro 8), muestra una relación negativa débil del rendimiento con conductividad eléctrica, materia orgánica, nitratos, fósforo y potasio, por tanto, estos indicadores tienen un efecto contrario, es decir, a medida que el rendimiento aumenta hay una disminución de nitrógeno, fósforo y potasio, el fruto de jitomate contiene una concentración de azúcares que demandan potasio, el requerimiento interno es de 2.1 kg de N, 0.7 kg de P₂O₅, 4.4 kg de K₂O por tonelada cosechada (Godoy *et al.*, 2009), el pH del suelo no tuvo relación con el rendimiento, sin embargo, aunque estadísticamente no afecta la producción del cultivo, puede alterar otros factores edáficos, que terminaran por afectar el rendimiento.

La conductividad eléctrica tiene relación positiva con los nitratos y el nitrógeno total, sin embargo, un incremento de nitrógeno no necesariamente representa un incremento en el rendimiento como lo demuestra (Ezequiel *et al.*, 2017) al probar diferentes dosis (170 y 225 kg de N por hectárea) sin encontrar diferencias en crecimiento y producción de jitomate en invernadero, pudiendo reducir la fertilización recomendada.

Cuadro 8. Análisis de correlación de Spearman, para los parámetros del suelo y rendimiento.

	pH	CE	MO	NT	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	P	K ⁺	Rendimiento
pH	1								
CE	-0.22	1							
MO	0.13	-0.22	1						
NT	-0.23	0.58	0.12	1					
NO ₃ ⁻	-0.18	0.83	-0.18	0.55	1				
NH ₄ ⁺	-0.31	0.42	-0.36	0.30	0.54	1			
P	0.04	0.21	0.25	0.37	-0.02	0.12	1		
K ⁺	0.49	0.26	0.18	0.12	0.20	-0.11	0.34	1	
Rendimiento	0.00	-0.04	-0.18	0.07	-0.03	0.14	-0.35	-0.19	1

6. CONCLUSIONES

La metodología empleada en el presente estudio, permitió detectar y caracterizar el manejo agrícola que se lleva a cabo en los invernaderos en la pequeña agricultura del municipio de Tetela de Ocampo, Puebla.

La superficie de cada unidad de producción es menor a 3000 m² en 87% de los invernaderos estudiados; sin embargo, predomina la asesoría, el interés por la capacitación técnica de los productores y el uso del servicio de análisis del suelo de manera periódica.

El uso intensivo y frecuente de insumos en la agricultura protegida de la región, incrementó la materia orgánica del suelo; como efecto negativo, también favoreció la acumulación de los nutrientes en el medio edáfico, hasta rebasar los criterios más elevados de la Norma Oficial Mexicana en todos los casos. A pesar que la gente cuenta con información recurrente sobre el exceso nutrimental que prevalece en cada sitio, continúa sin cambios la programación de fertilizantes, sin mejorar su productividad, la cual se mantiene en 31 kg m⁻² de jitomate como promedio anual.

7. LITERATURA CITADA

- Baligar, V. C., N. K. Fageria y Z. I. He. 2001. Nutrient use efficiency in plants. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 32(7-8): 921-950. <https://doi.org/10.1081/CSS-100104098>
- Alva, A. K., Paramasivam, S., Obreza, T. A., & Schumann, A. W. (2006). Nitrogen best management practice for citrus trees: I. Fruit yield, quality, and leaf nutritional status. *Scientia horticulturae*, 107(3), 233-244. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2005.05.017>
- Azeez, J. O., & Van Averbeke, W. (2012). Dynamics of soil pH and electrical conductivity with the application of three animal manures. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 43(6), 865-874. <https://doi.org/10.1080/00103624.2012.653022>
- Bai, X., Gao, J., Wang, S., Cai, H., Chen, Z., & Zhou, J. (2020). Excessive nutrient balance surpluses in newly built solar greenhouses over five years leads to high nutrient accumulations in soil. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 288, 106717. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106717>
- Bosch M., J.L. Costa, F.N. Cabria, V. Aparicio. (2012). Relación entre la variabilidad espacial de la conductividad eléctrica y el contenido de sodio del suelo. *Ciencia del suelo*, 30(2). https://www.researchgate.net/profile/virginiaaparicio/publication/285773017_Relationship_between_spatial_variability_of_electrical_conductivity_and_soil_sodium_content/links/5b97ef60a6fdcc59bf85db21/Relationship-between-spatial-variability-of-electrical-conductivity-and-soil-sodium-content.pdf
- Bouwman, A. F., Beusen, A. H., & Billen, G. (2009). Human alteration of the global nitrogen and phosphorus soil balances for the period 1970–2050. *Global Biogeochemical Cycles*, 23(4). <https://doi.org/10.1029/2009GB003576>.
- Bricker, S. B., Longstaff, B., Dennison, W., Jones, A., Boicourt, K., Wicks, C., & Woerner, J. (2008). Effects of nutrient enrichment in the nation's estuaries: a decade of change. *Harmful Algae*, 8(1), 21-32. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2008.08.028>
- Bugarín Montoya, R., Galvis Spinola, A., Hernández Mendoza, T. M., & García-Paredes, D. (2007). Capacidad amortiguadora y cinética de liberación de potasio en suelos. *Agricultura técnica en México*, 33(1), 73-81. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0568-25172007000100008&lng=es&nrm=iso. ISSN 0568-2517.
- Cabrera, R.I. 2011. Importancia de la calidad química del agua en el fertirriego en cultivos ornamentales. En: Flórez R., V.J. (Ed.). *Avances sobre Fisiología de la Producción de Flores de Corte en Colombia*. Bogotá: Editorial Universidad Nacional de Colombia. pp. 17-26.
- Carranca, C., Brunetto, G., & Tagliavini, M. (2018). Nitrogen nutrition of fruit trees to reconcile productivity and environmental concerns. *Plants*, 7(1), 4. <https://doi.org/10.3390/plants7010004>

- Cassman, K. G., Dobermann, A., & Walters, D. T. (2002). Agroecosystems, nitrogen-use efficiency, and nitrogen management. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 31(2), 132-140. <https://doi.org/10.1579/0044-7447-31.2.132>
- Cassman, K. G., & Dobermann, A. (2021). Nitrogen and the future of agriculture: 20 years on. *Ambio*, 1-8. <https://doi.org/10.1007/s13280-021-01526-w>
- Chang, J., Wu, X., Wang, Y., Meyerson, L. A., Gu, B., Min, Y., ... & Ge, Y. (2013). Does growing vegetables in plastic greenhouses enhance regional ecosystem services beyond the food supply?. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 11(1), 43-49. <https://doi.org/10.1890/100223>
- Correndo, A. A., Boxler, M., & García, F. O. (2015). Análisis económico del manejo de la fertilización con enfoque en el largo plazo. Economic analysis of fertilization management with focus on the long term. *Ciencia del suelo. revista de la Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo.*, 33(2). https://www.researchgate.net/profile/fernandogarcia20/publication/309069664_economic_analysis_of_fertilization_management_with_focus_on_the_long_term/links/582b005008ae138f1bf4468e/economic-analysis-of-fertilization-management-with-focus-on-the-long-term.pdf
- Cuero, R. (2012). Hacia un sistema complementario de producción más limpia en suelos degradados por salinidad. *Ambiente y Sostenibilidad* (2): 59-68. *Revista del Doctorado Interinstitucional en Ciencias Ambientales.* <http://hdl.handle.net/10893/8261>
- Dale, V., Bianchi, T., Blumberg, A., Boynton, W., Conley, D.J., Crumpton, W., David, M., Gilbert, D., Howarth, R.W., Kling, C., Lowrance, R.R., Mankin, K., Meyer, J.L., Opaluch, J., Paerl, H., Reckhow, K., Sanders, J., Sharpley, A.N., Simpson, T.W., Snyder, C., Wright, D., Stallworth, H., Armitage, T., Wangness, D. (2007). Hypoxia in the northern Gulf of Mexico: An update by the EPA Science Advisory Board. EPA-SAB-08e003). EPA Science Advisory Board, Washington, DC from. [https://yosemite.epa.gov/sab/SABPRODUCT.NSF/C3D2F27094E03F90852573B800601D93/\\$ File/EPA-SAB-08-003complete.pdf](https://yosemite.epa.gov/sab/SABPRODUCT.NSF/C3D2F27094E03F90852573B800601D93/$ File/EPA-SAB-08-003complete.pdf)
- Dobermann, A., & Cassman, K. G. (2002). Plant nutrient management for enhanced productivity in intensive grain production systems of the United States and Asia. *Plant and soil*, 247(1), 153-175. <https://doi.org/10.1023/A:1021197525875>
- Dobermann, A., Witt, C., Dawe, D., Abdulrachman, S., Gines, H. C., Nagarajan, R., ... & Adviento, M. A. A. (2002). Site-specific nutrient management for intensive rice cropping systems in Asia. *Field Crops Research*, 74(1), 37-66. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(01\)00197-6](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(01)00197-6)
- Dragosits, U., Dore, A. J., Sheppard, L. J., Vieno, M., Tang, Y. S., Theobald, M. R., & Sutton, M. A. (2008). Sources, dispersion and fate of atmospheric ammonia. *Nitrogen in the Environment*, 333-393. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374347-3.00011-1>

- Erel, R., Dag, A., Ben-Gal, A., Schwartz, A., & Yermiyahu, U. (2008). Flowering and fruit set of olive trees in response to nitrogen, phosphorus, and potassium. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 133(5), 639-647. <https://doi.org/10.21273/JASHS.133.5.639>
- Esmaeilzadeh, J., & Ahangar, A. G. (2014). Influence of soil organic matter content on soil physical, chemical and biological properties. *International Journal of Plant, Animal and Environmental Sciences*, 4(4), 244-252. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.1053.1590&rep=rep1&type=pdf>
- Ferreira, I. E., Zocchi, S. S., & Baron, D. (2017). Reconciling the Mitscherlich's law of diminishing returns with Liebig's law of the minimum. Some results on crop modeling. *Mathematical biosciences*, 293, 29-37. <https://doi.org/10.1016/j.mbs.2017.08.008>
- Filho, Arthur B. Cecílio, Luiz-Cavarianni, Rodrigo, Castro, Júlio C. Caetano de-, & Mendoza-Cortez, Juan W. (2011). Crecimiento y producción de repollo en función de la densidad de población y nitrógeno. *Agrociencia*, 45(5), 573-582. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S140531952011000500004&lng=es&tlng=es.
- Gastal, F., Lemaire, G., Durand, J. L., & Louarn, G. (2015). Quantifying crop responses to nitrogen and avenues to improve nitrogen-use efficiency. In *Crop physiology* (pp. 161-206). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-417104-6.00008-X>
- Gao, J. J., Bai, X. L., Zhou, B., Zhou, J. B., & Chen, Z. J. (2012). Soil nutrient content and nutrient balances in newly-built solar greenhouses in northern China. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 94(1), 63-72. <https://doi.org/10.1007/s10705-012-9526-9>
- Godoy Hernández, H., Castellanos Ramos, J. Z., Alcántar González, G., Sandoval Villa, M., & Muñoz Ramos, J. D. J. (2009). Efecto del injerto y nutrición de tomate sobre rendimiento, materia seca y extracción de nutrimentos. *Terra Latinoamericana*, 27(1), 01-09. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-57792009000100001&script=sci_arttext
- Good AG, Beatty PH (2011) Fertilizing Nature: A Tragedy of Excess in the Commons. *PLoS Biol* 9 (8): <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1001124>
- Goulding, K.W.T. (2016), Soil acidification and the importance of liming agricultural soils with particular reference to the United Kingdom. *Soil Use Manage*, 32: 390-399. <https://doi.org/10.1111/sum.12270>
- Gu, B., Ge, Y., Ren, Y., Xu, B., Luo, W., Jiang, H., ... & Chang, J. (2012). Atmospheric reactive nitrogen in China: sources, recent trends, and damage costs. *Environmental science & technology*, 46(17), 9420-9427. <https://doi.org/10.1021/es301446g>

- Guo, J. H., Liu, X. J., Zhang, Y., Shen, J. L., Han, W. X., Zhang, W. F., (2010). Significant acidification in major Chinese croplands. *Science* 327, 1008–1010. doi: 10.1126/science.1182570
- Gutiérrez, M., Biagioni, R. N., Alarcón-Herrera, M. T., & Rivas-Lucero, B. A. (2018). An overview of nitrate sources and operating processes in arid and semiarid aquifer systems. *Science of the total environment*, 624, 1513-1522. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.252>
- Hardin, G. (1968). The tragedy of the commons: the population problem has no technical solution; it requires a fundamental extension in morality. *science*, 162(3859), 1243-1248. DOI: 10.1126/science.162.3859.1243
- Hernández-Cruz, AE, Sánchez, E, Preciado-Rangel, P, García-Bañuelos, M L, Palomo-Gil, A, & Espinoza-Banda, A. (2015). Nitrate reductase activity, biomass, yield, and quality in cotton in response to nitrogen fertilization. *Phyton (Buenos Aires)*, 84(2), 454-460. http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1851-56572015000200026&lng=es&tlng=pt.
- Hoben, J. P., Gehl, R. J., Millar, N., Grace, P. R., & Robertson, G. P. (2011). Nonlinear nitrous oxide (N₂O) response to nitrogen fertilizer in on-farm corn crops of the US Midwest. *Global Change Biology*, 17(2), 1140-1152. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02349.x>
- Hu, W., Zhang, Y., Huang, B., & Teng, Y. (2017). Soil environmental quality in greenhouse vegetable production systems in eastern China: current status and management strategies. *Chemosphere*, 170, 183-195. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.12.047>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Prontuario de información geográfica nacional 21117. https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/21/21172.pdf
- Jacob, J. O., & Kakulu, S. E. (2012). Assessment of heavy metal bioaccumulation in spinach, jute mallow and tomato in farms within Kaduna Metropolis, Nigeria. *American Journal of Chemistry*, 2(1), 13-16. DOI: 10.5923/j.chemistry.20120201.04
- Ju, M., Xu, Z., Wei-Ming, S., Guang-Xi, X., & Zhao-Liang, Z. (2011). Nitrogen balance and loss in a greenhouse vegetable system in southeastern China. *Pedosphere*, 21(4), 464-472. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(11\)60148-3](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(11)60148-3).
- Ju, X. T., Xing, G. X., Chen, X. P., Zhang, S. L., Zhang, L. J., Liu, X. J., ... & Zhang, F. S. (2009). Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(9), 3041-3046. <https://doi.org/10.1073/pnas.0813417106>

- Kanter, D. R., Chodos, O., Nordland, O., Rutigliano, M., & Winiwarter, W. (2020). Gaps and opportunities in nitrogen pollution policies around the world. *Nature Sustainability*, 3(11), 956-963. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0577-7>.
- Kim, S., & Dale, B. E. (2008). Effects of nitrogen fertilizer application on greenhouse gas emissions and economics of corn production. *Environmental science & technology*, 42(16), 6028-6033. <https://doi.org/10.1021/es800630d>
- Kingery, W. L., Wood, C. W., Delaney, D. P., Williams, J. C., & Mullins, G. L. (1994). *Impact of long-term land application of broiler litter on environmentally related soil properties* (Vol. 23, No. 1, pp. 139-147). American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2134/jeq1994.00472425002300010022x>
- Li, M., Wang, Y., Adeli, A., & Yan, H. (2018). Effects of application methods and urea rates on ammonia volatilization, yields and fine root biomass of alfalfa. *Field Crops Research*, 218, 115-125. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.01.011>
- Liang, L. Z., Zhao, X. Q., Yi, X. Y., Chen, Z. C., Dong, X. Y., Chen, R. F., & Shen, R. F. (2013). Excessive application of nitrogen and phosphorus fertilizers induces soil acidification and phosphorus enrichment during vegetable production in Yangtze River Delta, China. *Soil use and management*, 29(2), 161-168. <https://doi.org/10.1111/sum.12035>
- Marschner, H. (Ed.). (2011). *Marschner's mineral nutrition of higher plants*. Academic press.
- McLaughlin, M.J., McBeath, T.M., Smernik, R. et al. The chemical nature of P accumulation in agricultural soils—implications for fertiliser management and design: an Australian perspective. *Plant Soil* 349, 69–87 (2011). <https://doi.org/10.1007/s11104-011-0907-7>.
- McLellan, E. L., Cassman, K. G., Eagle, A. J., Woodbury, P. B., Sela, S., Tonitto, C., & van Es, H. M. (2018). The nitrogen balancing act: tracking the environmental performance of food production. *Bioscience*, 68(3), 194-203. <https://doi.org/10.1093/biosci/bix164>
- Meneses, N., Mendoza-Cortez, J. W., & CecilioFilho, A. B. (2017). Fertilización potásica del maíz dulce en suelo con alta disponibilidad de potasio. *Agrociencia (Uruguay)*, 21(2), 54-58. http://www.scielo.edu.uy/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2301-15482017000200054&lng=es&tlng=pt.
- Melillo, E. D. (2012). The first green revolution: Debt peonage and the making of the nitrogen fertilizer trade, 1840–1930. *The American Historical Review*, 117(4), 1028-1060. <https://doi.org/10.1093/ahr/117.4.1028>

- Min, J., Zhang, H., & Shi, W. (2012). Optimizing nitrogen input to reduce nitrate leaching loss in greenhouse vegetable production. *Agricultural water management*, 111, 53-59. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.05.003>
- Mishima, S. I., Taniguchi, S., & Komada, M. (2006). Recent trends in nitrogen and phosphate use and balance on Japanese farmland. *Soil science and plant nutrition*, 52(4), 556-563. <https://doi.org/10.1111/j.1747-0765.2006.00069.x>
- Negi, V. S., Maikhuri, R. K., Rawat, L. S., & Parshwan, D. (2013). Protected cultivation as an option of livelihood in mountain region of central Himalaya, India. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 20(5), 416-425. <https://doi.org/10.1080/13504509.2013.799103>
- NOM (Norma Oficial Mexicana). 2002. NOM-021-RECNAT-2000 establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. Diario Oficial de la Federación
http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=756861&fecha=07/12/2001
- Okumoto, S., & Pilot, G. (2011). Amino acid export in plants: a missing link in nitrogen cycling. *Molecular plant*, 4(3), 453-463., <https://doi.org/10.1093/mp/ssl003>.
- Osorio, N. W. (2012). pH del suelo y disponibilidad de nutrientes. *Manejo Integral del Suelo y Nutrición Vegetal*, 1(4), 1-4. <https://www.bioedafologia.com/sites/default/files/documentos/pdf/pH-del-suelo-y-nutrientes.pdf>
- Pérez, N.D., Soler, M.M., Delgado, C.M., Reigada, A. (2018). Energy use and carbon footprint of the tomato production in heated multi-tunnel greenhouses in Almeria within an exporting agri-food system context. *Sci. Total Environ.* 628, 1627–1636. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.127>.
- Pérez Rosales, Alejandro, Galvis Spínola, Arturo, Bugarín Montoya, Rubén, Hernández Mendoza, Teresa Marcela, Vázquez Peña, Mario Alberto, & Rodríguez González, Agustín. (2017). Capacidad de intercambio catiónico: descripción del método de la tiourea de plata (AgTU + n). *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 8(1), 171-177. <https://doi.org/10.29312/remexca.v8i1.80>
- Pfromm, P. H. (2017). Towards sustainable agriculture: Fossil-free ammonia. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 9(3), 034702. <https://doi.org/10.1063/1.4985090>
- Powlson, D. S., Addiscott, T. M., Benjamin, N., Cassman, K. G., de Kok, T. M., van Grinsven, H., & Van Kessel, C. (2008). When does nitrate become a risk for humans? *Agronomy--Faculty Publications*, 102. <https://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1102&context=agronomyfacpub>

- Quiñones-Aguilar, Evangelina Esmeralda, Hernández-Acosta, Elizabeth, Rincón-Enríquez, Gabriel, & Ferrera-Cerrato, Ronald. (2012). Interacción de hongos micorrízicos arbusculares y fertilización fosfatada en papaya. *Terra Latinoamericana*, 30(2), 165-176. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S018757792012000200165&lng=es&tlng=es.
- Ramos, C., Alcántar, G., Galvis, A., Peña, A., & Martínez, A. (2002). Eficiencia de uso del nitrógeno en tomate de cáscara en fertirriego. *Terra Latinoamericana*, 20(4), 465-469. <https://www.redalyc.org/pdf/573/57320411.pdf>
- Rasmussen, C., Heckman, K., Wieder, W. R., Keiluweit, M., Lawrence, C. R., Berhe, A. A., ... & Wagai, R. (2018). Beyond clay: towards an improved set of variables for predicting soil organic matter content. *Biogeochemistry*, 137(3), 297-306. <https://doi.org/10.1007/s10533-018-0424-3>
- Ravier Clémence, Jean-Marc Meynard, Jean-Pierre Cohan, Philippe Gate, Marie-Hélène Jeuffroy, 2019. Early nitrogen deficiencies favor high yield, grain protein content and N use efficiency in wheat, *European Journal of Agronomy*, Volume 89. Pages 16-24, ISSN 1161-0301, <https://doi.org/10.1016/j.eja.2017.06.002>.
- Reyes, G. E., & Cortés, J. D. (2017). *Intensity of fertilizer use in Latin America and the Caribbean (2006-2012)*. Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado (UCLA). <https://repository.urosario.edu.co/handle/10336/23478>
- Robertson, G. P., & Vitousek, P. M. (2009). Nitrogen in agriculture: balancing the cost of an essential resource. *Annual review of environment and resources*, 34, 97-125. <https://doi.org/10.1146/annurev.environ.032108.105046>
- Rodríguez, J. 1993. La fertilización de los cultivos. Un método racional. Colección de Agricultura. Pontificia Universidad Católica de Chile. Facultad de Agronomía. Santiago de Chile, Chile. 291 p.
- Salvagiotti, F., Castellarín, J. M., Ferraguti, F. J., & Pedrol, H. M. (2011). Dosis óptima económica de nitrógeno en maíz según potencial de producción y disponibilidad de nitrógeno en la región pampeana norte. *Ciencia del suelo*, 29(2), 199-212. http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S185020672011000200009&lng=es&tlng=pt.
- Sánchez-González, M.J., Sánchez-Guerrero, M.C., Medrano, E., Porras, M.E., Baeza, E.J., García, M.L. y Lorenzo, P. 2014. Efectos de la salinidad y el enriquecimiento carbónico en invernadero sobre la bioproductividad y el contenido de nutrientes en un cultivo de tomate híbrido Raf (cv. Delizia). *Acta Horti*, 66:78-84 <http://www.sech.info/ACTAS/index.php?d=main>
- Setia, R., Marschner, P., Baldock, J., Chittleborough, D., & Verma, V. (2011). Relationships between carbon dioxide emission and soil properties in salt-affected landscapes. *Soil Biology and Biochemistry*, 43(3), 667-674. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.12.004>

- Scharf, P. C., Kitchen, N. R., Sudduth, K. A., Davis, J. G., Hubbard, V. C., & Lory, J. A. (2005). Field-scale variability in optimal nitrogen fertilizer rate for corn. *Agronomy journal*, 97(2), 452-461. <https://doi.org/10.2134/agronj2005.0452>
- Shen, W., Lin, X., Shi, W., Min, J., Gao, N., Zhang, H., ... & He, X. (2010). Higher rates of nitrogen fertilization decrease soil enzyme activities, microbial functional diversity and nitrification capacity in a Chinese polytunnel greenhouse vegetable land. *Plant and soil*, 337(1), 137-150. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0511-2>
- Shi, W. M., Yao, J., & Yan, F. (2009). Vegetable cultivation under greenhouse conditions leads to rapid accumulation of nutrients, acidification and salinity of soils and groundwater contamination in South-Eastern China. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 83(1), 73-84. <https://doi.org/10.1007/s10705-008-9201-3>
- Schroder, J. L., Zhang, H., Girma, K., Raun, W. R., Penn, C. J., & Payton, M. E. (2011). Soil acidification from long-term use of nitrogen fertilizers on winter wheat. *Soil Science Society of America Journal*, 75(3), 957-964. <https://doi.org/10.2136/sssaj2010.0187>
- SIAP. Sistema de información agrícola y pesquera. Producción anual agrícola. 2021. <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/produccion-agricola-33119>
- Sinclair, T. R., & Rufty, T. W. (2012). Nitrogen and water resources commonly limit crop yield increases, not necessarily plant genetics. *Global Food Security*, 1(2), 94-98. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2012.07.001>
- Stefanelli, D., Goodwin, I., & Jones, R. (2010). Minimal nitrogen and water use in horticulture: Effects on quality and content of selected nutrients. *Food Research International*, 43(7), 1833-1843. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.04.022>
- Subbarao, G. V., Arango, J., Masahiro, K., Hooper, A. M., Yoshihashi, T., Ando, Y., & Iwanaga, M. (2017). Genetic mitigation strategies to tackle agricultural GHG emissions: The case for biological nitrification inhibition technology. *Plant Science*, 262, 165-168. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2017.05.004>
- Tian, D., & Niu, S. (2015). A global analysis of soil acidification caused by nitrogen addition. *Environmental Research Letters*, 10(2), 024019. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/10/2/024019/meta>
- Tilman, D., Cassman, K. G., Matson, P. A., Naylor, R., & Polasky, S. (2002). Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, 418(6898), 671-677. <https://doi.org/10.1038/nature01014>
- Vašák, F., Černý, J., Buráňová, Š., Kulhánek, M., & Balík, J. (2015). Soil pH changes in long-term field experiments with different fertilizing systems. *Soil and Water Research*, 10(1), 19-23. DOI: 10.17221/7/2014-SWR
- Van Herwaarden, A. F., Farquhar, G. D., Angus, J. F., Richards, R. A., & Howe, G. N. (1998). 'Haying-off', the negative grain yield response of dryland wheat to nitrogen

- fertiliser. I. Biomass, grain yield, and water use. *Australian Journal of Agricultural Research*, 49(7), 1067-1082. <https://doi.org/10.1071/A97039>
- Vitousek, P. M., Naylor, R., Crews, T., David, M. B., Drinkwater, L. E., Holland, E., Johnes, P. J., Katzenberger, J., Martinelli, L. A., Matson, P. A., Nziguheba, G., Ojima, D., Palm, C. A., Robertson, G. P., Sanchez, P. A., Townsend, A. R., & Zhang, F. S. (2009). Nutrient Imbalances in Agricultural Development. *Science*, 324(5934), 1519-1520. <http://centaur.reading.ac.uk/4191/>
- Wang, X., Zou, C., Gao, X., Guan, X., Zhang, W., Zhang, Y., ... & Chen, X. (2018). Nitrous oxide emissions in Chinese vegetable systems: a meta-analysis. *Environmental Pollution*, 239, 375-383. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.03.090>
- Yao, Y., Zhang, M., Tian, Y., Zhao, M., Zhang, B., Zhao, M., ... & Yin, B. (2018). Urea deep placement for minimizing NH₃ loss in an intensive rice cropping system. *Field Crops Research*, 218, 254-266. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.03.013>
- Yan, Z., Chen, S., Li, J., Alva, A., & Chen, Q. (2016). Manure and nitrogen application enhances soil phosphorus mobility in calcareous soil in greenhouses. *Journal of environmental management*, 181, 26-35. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.05.081>
- Yan, N., Marschner, P., Cao, W., Zuo, C., & Qin, W. (2015). Influence of salinity and water content on soil microorganisms. *International Soil and Water Conservation Research*, 3(4), 316-323. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2015.11.003>
- Yu, C., Huang, X., Chen, H., Godfray, H. C. J., Wright, J. S., Hall, J. W., ... & Taylor, J. (2019). Managing nitrogen to restore water quality in China. *Nature*, 567(7749), 516-520. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1001-1>
- Zak, D. R., Freedman, Z. B., Upchurch, R. A., Steffens, M., & Kögel-Knabner, I. (2017). Anthropogenic N deposition increases soil organic matter accumulation without altering its biochemical composition. *Global Change Biology*, 23(2), 933-944. <https://doi.org/10.1111/gcb.13480>
- Zermeño González, A., Cruz Santes, C. I., Munguía López, J. P., Catalán Valencia, E. A., Campos Magaña, S. G., & Cortés Bracho, J. D. J. (2014). Efecto del sistema de riego y clima en la eficiencia del uso de agua de nogal pecanero. *Terra Latinoamericana*, 32(1), 23-33. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S018757792014000100023&lng=es&tlng=es.
- Zekri, M., & Obreza, T. (2013). Nitrogen (N) for citrus trees. EDIS, 2013(6). http://edis.ifas.ufl.edu/topic_series_citrus_tree_nutrients
- Zhang, B., Li, Q., Cao, J., Zhang, C., Song, Z., Zhang, F., & Chen, X. (2017). Reducing nitrogen leaching in a subtropical vegetable system. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 241, 133-141. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.03.006>