e-ISSN: 2448-7368 / ISSN print: 0186-4394
https://doi.org/10.5154/r.rga.2024.74.16

Potentially Toxic Elements in Maize Agroecosystems of Españita, Tlaxcala

Itzel Ángeles Hernández González[1];
Atenógenes Leobardo Licona Vargas[2]*;
Claudia Fernández González[3];
María Virginia González Santiago[2]

Abstract

Agricultural practices can contribute to soil contamination with potentially toxic elements (PTEs), which have adverse effects on the environment and human health. For this reason, this study evaluated soil contamination by heavy metals and metalloids (PTEs) and its relationship with the management of maize agroecosystems under agroecological transition and conventional systems in Españita, Tlaxcala. The agroecosystems were characterized through interviews with farmers, and soil samples were analyzed to determine their properties and PTE concentrations. The results showed that both types of agroecosystems use low amounts of industrial agricultural inputs and integrate practices from both traditional small-scale farming and conventional agriculture. Additionally, PTE concentrations did not exceed maximum acceptable levels, indicating that the studied agroecosystems are a source of food free from heavy metal. Agroecosystems in agroecological transition showed a greater soil buffering capacity against PTEs, as they exhibited pH values closer to neutrality, higher organic matter content, and greater cation exchange capacity (CEC) compared to conventional agroecosystems. To reduce the potential for PTE contamination, the design and management of agroecosystems that enhance soil buffering capacity should be promoted, and the impact of other contaminants should also be studied.

Keywords: Agroecological practices, heavy metals, soil degradation, agroecosystems, agroecological transition

Elementos potencialmente tóxicos en agroecosistemas de maíz de Españita, Tlaxcala

Resumen

Las prácticas agrícolas pueden contribuir a la contaminación del suelo con elementos potencialmente tóxicos (EPT) que tienen efectos adversos sobre el ambiente y la salud humana. Por este motivo, se investigó la contaminación del suelo por metales pesados y metaloides (EPT) y su relación con el manejo de agroecosistemas de maíz en transición agroecológica y convencionales de Españita, Tlaxcala. Los agroecosistemas se caracterizaron mediante entrevistas a los agricultores, y se analizaron los suelos para determinar sus propiedades y la concentración de EPT. Se determinó que ambos tipos de agroecosistemas emplean pocas cantidades de insumos agrícolas industriales y que mantienen tecnologías tanto de la agricultura campesina como de la agricultura convencional. Además, se estableció que las concentraciones de EPT no superan los niveles máximos aceptables, lo que indica que los agroecosistemas estudiados constituyen una fuente de alimentos libres de metales pesados. Los agroecosistemas en transición agroecológica mostraron una mayor capacidad de amortiguamiento del suelo frente a los EPT, ya que presentaron pH más cercanos a la neutralidad, mayor contenido de materia orgánica y CIC más alta en comparación con los agroecosistemas convencionales. Para reducir el potencial de contaminación por EPT, debe promoverse el diseño y gestión de agroecosistemas que mejoren la capacidad de amortiguamiento del suelo y debe investigarse el impacto de otros contaminantes.

Palabras clave: Prácticas agroecológicas, metales pesados, degradación del suelo, agroecosistemas, transición agroecológica.

[1]Investigadora asociada del CONAHCYT al proyecto 318962, Ave. De los Insurgentes Sur 1582, Crédito Constructor, Benito Juárez CDMX, C. P. 03949.

[2]Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Agroecología, km 38.5 carretera México-Texcoco, Chapingo, Estado de México. C. P. 56230. México.

[3]Instituto Nacional de Investigación Forestal Agrícola y Pecuaria (INIFAP), Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Conservación y Mejoramiento de Ecosistemas Forestales (CENID-COMEF), Ave. Progreso 96, Santa Catarina, Coyoacán, Ciudad de México. CDMX, C. P. 04010, México.

*Corresponding author: aliconav@chapingo.mx; lateno_60@yahoo.com.mx Tel. 5951219272, ORCID ID: 0000-0002-7248-5663

Received: November 11, 2024 | **Accepted:** July 12, 2025 | **Published online:** October 23,2025

Introduction

Heavy metals and metalloids can become Potentially Toxic Elements (PTEs) for individuals who regularly consume maize (*Zea mays*) (Ruiz-Huerta et al., 2022). Some heavy metals and metalloids are important for plant metabolism; however, high concentrations can be detrimental to plant development, environmental health, and the well-being of people who rely on the food and medicinal resources of agroecosystems (Rashid et al., 2023). Therefore, the term "Potentially Toxic Elements" (PTEs) refers to chemical elements that are environmentally and toxicologically significant (Volke-Sepúlveda et al., 2005).

According to the Mexican Official Standard "NOM-147-SEMARNAT-SSA1-2004," twelve PTEs are subject to regulatory oversight. These elements are: As, Ba, Be, Cd, Cr, Hg, Ni, Ag, Pb, Se, Ta, and V, which are important due to their prevalence in contaminated sites and their association with adverse health effects (SEMARNAT, 2007). In addition, there have been proposals to include other metals such as Al, Co, and Si as potential PTEs (Volke-Sepúlveda et al., 2005). NOM-147 establishes the maximum allowable concentrations (MAC) of these elements in soil as a criterion for determining contamination status and the need for remediation. It is important to note that the permissible concentration limits vary by country (Belmonte-Serrato et al., 2010).

In the Atoyac-Zahuapan basin, located in Tlaxcala, CONAGUA confirmed in 2007 that the water bodies in the region are classified as highly hazardous due to their high concentrations of PTEs (Méndez-Serrano et al., 2017). This has led to health problems among people living in communities near the basin's tributaries. It has been inferred that such health issues are associated with exposure to toxic residues present in the air and water, resulting from industrial activity, as well as from diffuse sources such as the irrigation of crops with contaminated water and the application of fertilizers and pesticides in conventional agriculture (CONAHCYT, 2023).

To contribute to the understanding of the impact of PTEs in agricultural soils of the Atoyac-Zahuapan basin, particularly in Tlaxcala, this study analyzed maize-based agroecosystems, because they are the most widespread in the region and maize is the primary grain for household consumption. In Tlaxca-

Introducción

Los metales pesados y los metaloides pueden convertirse en Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT) para las personas que consumen maíz (*Zea mays*) de forma regular (Ruiz-Huerta et al., 2022). Algunos metales pesados y metaloides son importantes para el metabolismo de las plantas, sin embargo, las concentraciones elevadas pueden perjudicar su desarrollo, la salud del ambiente y de las personas que aprovechan los recursos alimenticios y medicinales de los agroecosistemas (Rashid et al., 2023). Por ello, el término de elementos potencialmente tóxicos (EPT) se refiriere a aquellos elementos químicos importantes desde el punto de vista ambiental y toxicológico (Volke-Sepúlveda et al., 2005).

De acuerdo con la norma oficial mexicana "NOM-147.SEMARNAT-SSA1-2004", doce EPT están sujetos a supervisión reglamentaria. Los elementos son: As, Ba, Be, Cd, Cr, Hg, Ni, Ag, Pb, Se, Ta y V, mismos que se consideran relevantes debido a su prevalencia en lugares contaminados y a su asociación con efectos adversos para la salud (SEMARNAT, 2007). Además, existen propuestas para incluir otros metales como el Al, Co y Si como posibles EPT (Volke-Sepúlveda et al., 2005). La norma NOM 147 establece las concentraciones máximas aceptables (CMA) de los elementos en el suelo como criterio para determinar el estado de contaminación y la necesidad de remediación. Cabe señalar que los límites permisibles de concentración son diferentes en cada país (Belmonte-Serrato et al., 2010).

En la cuenca del Atoyac-Zahuapan, en Tlaxcala la CONAGUA confirmó, en el año 2007, que los cuerpos de agua son clasificados como de alto grado de peligrosidad debido a sus altas concentraciones de EPT (Méndez-Serrano et al., 2017). Esto ha provocado problemas de salud en las personas que viven en comunidades aledañas a los afluentes de la cuenca. Se ha inferido que tales problemas de salud se asocian a la exposición de residuos tóxicos presentes en el aire y el agua como consecuencia de la industria, así como de fuentes difusas como el riego de cultivos con agua contaminada y la aplicación de fertilizantes y plaguicidas en la agricultura convencional (CONAHCYT, 2023).

Con la finalidad de aportar a la comprensión del impacto de los EPT en suelos agrícolas de la cuenca Atoyac-Zahuapan, en particular en Tlaxcala, en este trabajo se estudiaron los agroecosistemas con maíz porque son los más abundantes en el territorio y es el grano

la, about 50 % of the total area under rainfed agriculture is planted with maize for grain and forage, with limited technological input and low yields (INIFAP, 2021). Most producers grow it as a monoculture (also referred to as conventional agriculture), while about 20 % practice intercropping and crop rotation, mainly with beans, fava beans, and squash—systems also considered part of traditional farming technologies (Sánchez-Morales & Romero-Arenas, 2018). Similarly, Damian-Huato et al. (2010) classify this type of production within peasant agriculture with agroecological management, which integrates Green Revolution technologies with traditional practices.

Maize monoculture is characterized by the use of improved seeds, chemical fertilizers, herbicides, insecticides, and mechanized tillage equipment (Sánchez-Morales & Romero-Arenas, 2018). In contrast, maize grown in association, whether within traditional technology, peasant agriculture, or agroecological management systems—employs similar technological components but emphasizes the use of native seeds, crop associations and rotations with legumes, manure management, soil conservation practices, and reduced use of fertilizers and herbicides (Damian-Huato et al., 2010). The average yield of rainfed maize grain in the region is 2.56 tons per hectare, which is below the national average of 2.69 tons per hectare (SIAP, 2024). However, yields of up to seven tons per hectare have been recorded (Sánchez-Morales & Romero-Arenas, 2018).

Agricultural productivity decline has also been linked to environmental degradation (Alvarado-Cardona et al., 2007). In Tlaxcala, 93 % of the land area is affected by water and wind erosion, while 23.54 % shows decreased fertility and loss of organic matter (SEMARNAT-CP, 2002). Evidence suggests that certain farming practices contribute to both this environmental deterioration and the accumulation of heavy metals and metalloids in the soil. One such contributing factor is the irrigation of maize and alfalfa fields with water contaminated by industrial activities (Castro-González et al., 2019).

Other agricultural practices identified as sources of heavy metals and metalloids in soil include the use of inorganic fertilizers, pesticides, manure and compost, sewage sludge, and anti-hail rockets (Martí et al., 2002; Rashid et al., 2023). Although these practices are

principal para el consumo familiar. En Tlaxcala, aproximadamente el 50 % de la superficie total de agricultura de temporal se siembra con maíz para grano y forraje con escasa tecnificación y bajos rendimientos (INIFAP, 2021). La mayoría de los productores lo cultivan en monocultivo (también llamado convencional), mientras que un 20 % lo hace en asociación y rotación principalmente con frijol, haba y calabaza, también considerado de tecnología tradicional (Sánchez-Morales & Romero-Arenas, 2018). Asimismo, Damian-Huato et al. (2010) lo ubica en la corriente de agricultura campesina con manejo agroecológico, en la que se combinan tecnologías de la revolución verde con las tradicionales.

El cultivo de maíz en monocultivo se caracteriza por el uso de semillas mejoradas, fertilizantes químicos, herbicidas, insecticidas, maquinaria y equipo para la labranza (Sánchez-Morales & Romero-Arenas, 2018). En el caso del cultivo de maíz en asociación (de tecnología tradicional, de agricultura campesina o con manejo agroecológico) se emplean los mismos componentes tecnológicos, pero resaltan las semillas criollas, las asociaciones y rotaciones con leguminosas, el manejo del estiércol y las prácticas de conservación del suelo, así como el uso reducido de fertilizantes y herbicidas (Damian-Huato et al., 2010). El rendimiento promedio de grano de maíz de temporal en la región es de 2.56 toneladas por hectárea, lo que está por debajo de la media nacional (2.69 toneladas por hectárea) (SIAP, 2024). Sin embargo, se han registrado rendimientos de hasta siete toneladas por hectárea (Sánchez-Morales & Romero-Arenas, 2018).

La disminución de la productividad agrícola también puede atribuirse a la degradación ambiental (Alvarado-Cardona et al., 2007), dado que el 93 % de la superficie del estado está afectada por erosión hídrica y eólica, y el 23.54 % presenta declinación de la fertilidad y pérdida de materia orgánica (SEMARNAT-CP, 2002). Se ha documentado que ciertas prácticas agrícolas pueden contribuir al deterioro ambiental antes señalado, pero además a la presencia de metales pesados y metaloides en el suelo. Esto es consecuencia del riego de parcelas de maíz y alfalfa con aguas contaminadas por la actividad industrial (Castro-González et al., 2019).

Otras prácticas agrícolas identificadas como fuentes de metales pesados y metaloides en el suelo son el uso de fertilizantes inorgánicos, plaguicidas, estiércol y compost, lodos de aguas residuales y el uso de cohetes an-

intended to enhance the productivity of agroecosystems, they also lead to soil degradation and reduced productivity when contaminant levels exceed acceptable thresholds.

Although the presence of metals and metalloids is often linked to agricultural practices and inputs, their origin, diversity, and concentration in different agroecosystems must be studied. Alloway (2013) indicates that these elements occur naturally in all soil worldwide, either as total concentration or as bioavailable forms, and in highly variable amounts. The natural sources of metals and metalloids in soil include the weathering of parent material, the breakdown of volcanic rocks, calcareous sediments, phosphorus-rich deposits, and iron oxides (Alloway, 2013; Srivastava et al., 2017). Therefore, agricultural practices that enhance physical, chemical, and biological weathering of the soil's mineral fraction may have undesirable effects by releasing these elements.

Another significant source of metals and metalloids is their removal and deposition by wind, dust, aerosol-sized particles, and gaseous metals. Heavy metals in the atmosphere have been documented to come from different sources, including emissions from smelting and pyrometallurgical industries, vehicle emissions, cigarette smoke, domestic fires, forest and landfill fires, and the corrosion or wear of metal structures like galvanized sheets, among others (Alloway, 2013; Rashid et al., 2023).

Phosphate fertilizers have been identified as the primary source of potentially toxic elements (PTEs) among agricultural inputs (Martí et al., 2002; Rashid et al., 2023). These fertilizers often contain higher concentrations of lead (Pb) and cadmium (Cd) compared to nitrogen-based fertilizers (Martí et al., 2002). The levels of metals and metalloids in composted fertilizers vary widely, depending on the materials used and the production processes involved (Rodríguez-Alfaro et al., 2012; Dueñas-Rivadeneira and Intriago-Flor, 2022). Additionally, pesticides can contain elements such as copper Cu, Zn, Cd, Pb and As, either as active ingredients or as part of their inert components (Srivastava et al., 2017).

Exposure to PTEs poses health risks due to the use of agricultural inputs, as well as the consumption of contaminated water and harvested crops. Therefore, it is essential to assess the presence and concentra-

tigranizo (Martí et al., 2002; Rashid et al., 2023). Aunque las prácticas mencionadas pretenden aumentar la productividad de los agroecosistemas, también provocan la degradación del suelo y disminución de la productividad cuando su contenido rebasa los niveles tolerados.

Aunque la presencia de metales y metaloides suele estar vinculada a las prácticas e insumos agrícolas, se debe examinar su origen, así como su diversidad y concentración en los distintos agroecosistemas. Alloway (2013) indica que estos elementos están presentes de manera natural en todos los suelos del mundo, ya sea como concentración total o como concentración disponible para los organismos y en cantidades muy variables. La fuente de metales y metaloides en el suelo por causas naturales se deriva de la intemperización del material parental, la desintegración de rocas volcánicas, los sedimentos calcáreos, los depósitos ricos en fósforo y óxidos de hierro (Alloway, 2013 y Srivastava, et al., 2017). Por consiguiente, las prácticas agrícolas que facilitan la intemperización física, química y biológica de la fracción mineral del suelo, pueden tener efectos indeseables al liberar estos elementos.

Otra fuente importante de metales y metaloides es la remoción y deposición, por el viento, polvo, partículas del tamaño de aerosoles y metales gaseosos. Se ha documentado que los metales pesados presentes en la atmósfera son generados por diversas fuentes como las emisiones de industrias de fundición y pirometalurgia, las emisiones de los vehículos, el humo de cigarro, el fuego doméstico, los incendios forestales y de basureros, el desgaste de estructuras metálicas como las láminas galvanizadas, entre otros (Alloway, 2013; Rashid et al., 2023).

En cuanto a la contribución de metales pesados y metaloides a través de los insumos agrícolas, se ha demostrado que los fertilizantes fosfatados aportan los niveles más altos de EPT (Martí et al., 2002; Rashid et al., 2023). Estos fertilizantes pueden contener niveles más elevados de Pb y Cd que los fertilizantes nitrogenados (Martí et al., 2002). Las concentraciones de metales y metaloides en los abonos compostados presentan una variabilidad considerable, que depende de los procesos y materiales empleados en su elaboración (Rodríguez-Alfaro et al., 2012; Dueñas-Rivadeneira e Intriago-Flor, 2022). Los pesticidas, por su parte, pueden contener principalmente Cu, Zn, Cd, Pb y As como parte de sus ingredientes activos o inertes (Srivastava et al., 2017).

tion of these elements in agroecosystems. This need is especially relevant in the municipality of Españita, where a study conducted by CONAHCYT (2023) involving biomonitoring of adolescents aged 12 to 15 revealed kidney issues and PTE levels exceeding the limits recommended by the WHO. The study found that over 50 % of the adolescents had detectable levels of Pb, Cr, and Cd, while As was present in only 5% of the participants.

Based on the above, this document reports the presence of PTEs in two types of maize-based agroecosystems in communities of Españita, Tlaxcala: those where conventional management practices predominate, and those that have been undergoing an agroecological transition over the past eight years. Although, according to Tittonell (2019), the agroecological transition is a multidimensional and multiscalar process, this study adopts the perspective of Costabeber (1998), cited by Rodríguez (2015), who defines it as a continuous process aimed at shifting agroecosystem management from a conventional model to one based on ecological principles. For both groups, the structure and functioning of the agroecosystems were analyzed, with an emphasis on agricultural practices and inputs as potential sources of PTEs. Additionally, the presence and levels of PTEs in the soil were identified, which are presumably linked to the agricultural practices carried out. The underlying premise is that PTE levels in agroecosystems undergoing agroecological transition are lower compared to those where conventional practices predominate.

Materials and Methods

Study area. This research was conducted in maize plots located in four communities of the municipality of Españita, Tlaxcala: San Francisco Mitepec, La Magdalena Cuextotitla, La Reforma, and La Constancia. Españita is situated between 19° 22′ and 19° 30′ N and 98° 20′ and 98° 31′ W l, at an elevation ranging from 2 400 to 2 900 meters. The terrain consists of low hills with slopes between 1–15 %. The climate is temperate sub-humid, with an average annual precipitation ranging from 700 to 800 mm and an average temperature between 12 and 14 °C (INEGI, 2010). The underlying rock is of extrusive igneous origin, primarily andesite and intermediate tuff, and the predominant soil type is Cambisol (Flores-Domínguez & Priego-

Existen riesgos a la salud humana por la exposición a EPT por el manejo de los insumos agrícolas, el consumo de agua y productos cosechados contaminados, por lo que es necesario averiguar la presencia y los niveles de EPT en los agroecosistemas. Más aún por el hecho de que, particularmente para el municipio de Españita, en un estudio del CONAHCYT (2023) a través de un biomonitoreo en adolescentes de entre 12 y 15 años, detectaron problemas renales y presencia de EPT que rebasaron los valores recomendados por la OMS en la población participante. Se reportan Pb, Cr y Cd en más del 50 % de los adolescentes, y el As en solo el 5 % de los participantes.

Por lo anterior, en el presente documento se reporta la presencia de EPT en dos tipos de agroecosistemas con maíz en comunidades de Españita, Tlax.; aquellos con predominancia de prácticas de manejo convencional y los que se han incorporado a un proceso de transición agroecológica en los últimos ocho años. Aunque según Tittonell (2019) el proceso de transición agroecológica es multidimensional y multiescalar, en este estudio se acota la opinión de Costabeber (1998), citado por Rodríguez (2015), quien acota que es un proceso continuo para cambiar las formas de manejo de agroecosistemas desde un modelo convencional a otro basado en principios ecológicos. Para ambos grupos se identificó la estructura y el funcionamiento de agroecosistemas, haciendo hincapié en las prácticas agrícolas y los insumos como posibles fuentes de EPT. Asimismo, se identificó la presencia y los niveles de EPT en el suelo, que presumiblemente se derivan de las prácticas agrícolas llevadas a cabo. La premisa es que los niveles de EPT en los agroecosistemas en transición agroecológica son menores en comparación con aquellos en los que predomina las prácticas convencionales.

Materiales y Métodos

Área de estudio. La investigación se realizó en parcelas de maíz ubicadas en cuatro comunidades del municipio de Españita, Tlaxcala: San Francisco Mitepec, La Magdalena Cuextotitla, La Reforma y La Constancia. Españita se localiza entre los paralelos 19° 22′ y 19° 30′ N; los meridianos 98° 20′ y 98° 31′ O; a una altitud entre 2 400 y 2 900 m; con un relieve de lomeríos con pendientes entre 1-15 %. El clima es templado subhúmedo, con un rango de precipitación promedio anual de 700 a 800 mm y un rango de temperatura de 12 a

Santander, 2021). The dominant land cover and use is rainfed agriculture (Flores-Domínguez & Priego-Santander, 2021).

Selection and Characterization of Agroecosystems. The selected plots are located on terraced slopes near water streams in communities where health issues related to PTE contamination have been identified (CONAHCYT, 2023). A total of 20 rainfed maize plots were selected and classified into two groups: a) 14 conventional agroecosystems where hybrid maize is grown in monoculture using agrochemicals, and b) 6 agroecosystems that have been undergoing agroecological transition for two to eight years, where native maize is grown in association with other crops, and organic inputs are produced and used. This latter group of farmers is part of the grassroots organization *Centro de Economía Social Julián Garcés A.C.*, which has recovered traditional practices and incorporated agroecological innovations such as the production and use of bio-inputs.

The agroecosystems were characterized through semi-structured interviews and direct observation, focusing on cultivated and utilized plant diversity, cultural practices, inputs used, and local perceptions regarding possible agrochemical contamination and its health effects. Structural aspects (spatial and temporal distribution of seasonal crops, trees, and shrubs) and technological aspects were compared between both types of agroecosystems, as these factors may contribute to, prevent, or retain PTEs.

Sample Collection. In each plot, a composite soil sample was taken at a depth of 0 to 20 cm at the end of the maize growing season (ten in the third week of November 2022 and ten at the end of the 2023 season). The 20 samples were sent to a private laboratory, where soil fertility characteristics and PTE content were analyzed. The laboratory report indicated that Ni, Co, As, Ba, Cr, Cd, and Al were determined using the EPA6010C 2007 method; Pb, Si, and Be were analyzed using the ICP-AES method; and Cu and Zn were extracted with DTPA and Sorbitol and analyzed by ICP-PLASMA, internal method MET-SU-46.

Data Analysis. A comparative analysis of the results was carried out between two maize agroecosystem categories (conventional and in agroecological transition) to identify opportunities to produce healthy food (free of toxic elements) to promote family well-being.

14 °C (INEGI, 2010). El origen de la roca es ígnea extrusiva de tipo andesita y toba intermedia, y el tipo de suelo predominante es el Cambisol (Flores-Domínguez & Priego-Santander, 2021). La cobertura y el uso del suelo predominante es la agricultura de temporal (Flores-Domínguez & Priego-Santander, 2021).

Selección y caracterización de agroecosistemas. Las parcelas seleccionadas se encuentran en laderas de terrazas, aledañas a corrientes de agua de comunidades donde se han identificado problemas de salud asociados a la contaminación por EPT (CONAHCYT, 2023). Se seleccionaron 20 parcelas de maíz de temporal y se clasificaron en dos grupos: a) 14 agroecosistemas convencionales en los que se cultiva maíz híbrido en monocultivo y se utilizan agroquímicos y b) 6 agroecosistemas que llevan dos y ocho años en transición agroecológica en los que se cultiva maíz criollo asociado con otros cultivos y se producen y utilizan insumos orgánicos. Este grupo de productores forman parte de la organización de base Centro de Economía Social Julián Garcés A. C., mismos que han recuperado prácticas tradicionales e incorporado innovaciones agroecológicas como la elaboración y uso de bioinsumos.

Los agroecosistemas se caracterizaron mediante entrevistas semiestructuradas y observación directa sobre la diversidad vegetal cultivada y aprovechada, las prácticas culturales, los insumos utilizados y la percepción de las personas sobre la posible contaminación por agroquímicos y sus efectos sobre la salud. Se compararon los aspectos de estructura (distribución espacio-temporal de cultivos estacionales, árboles y arbustos) y aspectos tecnológicos entre ambos tipos de agroecosistemas, que presumiblemente aportan, previenen o retienen EPT.

Toma de muestra. En cada parcela se tomó una muestra compuesta de suelo a una profundidad de 0 a 20 cm al final del ciclo de cultivo de maíz (diez en la tercera semana de noviembre de 2022 y diez al final del ciclo 2023). Las 20 muestras se enviaron a un laboratorio privado, en donde se realizaron las determinaciones de las características de fertilidad del suelo y del contenido de EPT. El informe del laboratorio indicó que el Ni, Co, As, Ba, Cr, Cd y Al se determinaron mediante el método EPA6010C 2007; el Pb, Si y Be, por el método ICP-AES; y el Cu y Zn, por extracción con DTPA y Sorbitol por ICP-PLASMA, método interno MET-SU-46.

The soil properties presented were those that primarily influence the presence and dynamics of PTEs in the soil, such as organic matter content (OM), pH, and cation exchange capacity (CEC) (Rashid et al., 2023). The behavior of these parameters was reported for both types of agroecosystems, and their evaluation was based on the reference values provided by Castellanos et al. (2000).

To assess whether there were significant differences between the management systems regarding soil properties and PTE levels, the Shapiro-Wilk test was first applied, revealing that the data did not follow a normal distribution. Consequently, the non-parametric Mann-Whitney U test was conducted with a significance level of $P < 0.05$ (IBM SPSS, 2012). PTE values were compared to the maximum acceptable concentrations (MAC) established by Mexican regulations (SEMARNAT, 2007) and international standards (Belmonte-Serrato et al., 2010) to determine the potential presence of contamination in the agroecosystems.

Results and Discussion

This section is composed of four aspects: the structure of the agroecosystems, their functioning, the physical and chemical conditions of the soil, and the PTE content in the soil. Each subsection includes a comparative description between the two types of agroecosystems, and Table 1 provides a summary of the key points from this comparative analysis.

Structure of the Agroecosystems

Both types of agroecosystems evaluated are established on terraces with soil ridges. Notably, some of these soil ridges are aligned along contour lines, and 30 % of the plots feature border-ditches designed for water and soil retention.

The vertical and horizontal structure in both types of agroecosystems corresponds to agroforestry systems over 60 years old, as forest trees (such as white cedar, pine, tepozan, oak, Montezuma bald cypress, and fir), fruit trees (including capulín, apple, hawthorn, pear, peach, plum, loquat, avocado, walnut, pine nut, and quince), shrub species (such as jarilla, palo dulce, and escobilla), as well as pulque agave and prickly pear cactus, are present along the soil ridges, boundaries, and paths. This diversity is consistent with the vegetation list reported by Pérez-Sánchez (2014).

Análisis de los datos. Se realizó un análisis comparativo de los resultados entre las dos categorías de agroecosistemas de maíz (convencional y en transición agroecológica) con la finalidad de encontrar oportunidades de producción de alimentos sanos (libres de elementos tóxicos) para el bienestar familiar.

Con respecto al análisis de las propiedades del suelo, se presentaron aquellas que influyen primordialmente en la presencia y dinámica de los EPT en el suelo, como son el contenido de materia orgánica (M.O.), el pH y la capacidad de intercambio catiónico (CIC) (Rashid et al., 2023). Se reporta el comportamiento de estos parámetros en los dos tipos de agroecosistemas y su calificación está basada en los valores de referencia contenidos en Castellanos et al. (2000).

Para conocer si existen diferencias entre los sistemas de manejo con respecto a sus propiedades del suelo y de EPT, primero se utilizó la prueba de Shapiro-Wilk que indicó que los datos no se distribuyeron normalmente. Por lo tanto, se utilizó la prueba U de Mann-Whitney con un nivel de significación de $P <$ 0,05 (IBM SPSS, 2012). Los valores de EPT se compararon con las concentraciones máximas aceptables (CMA), establecidas por la norma mexicana (SEMARNAT, 2007) y la de otros países (Belmonte-Serrato et al., 2010) con el fin de determinar si existen agroecosistemas contaminados.

Resultados y Discusión

Este apartado se compone de cuatro aspectos que son: la estructura de los agroecosistemas, el funcionamiento de estos, las condiciones físicas y químicas del suelo y el contenido de EPT en el suelo. En cada apartado se realiza una descripción comparativa entre ambos tipos de agroecosistemas y en el Cuadro 1 se presenta un resumen de aspectos relevantes de esta descripción comparativa.

Estructura de los agroecosistemas

Ambos tipos de agroecosistemas evaluados se desarrollan en terrazas con bordos de tierra compactada. Cabe destacar que algunos de los bordos se encuentran alineados con curvas de nivel y que el 30 % de parcelas cuentan con zanjas-bordo para retención de agua y suelo.

La estructura vertical y horizontal en ambos tipos de agroecosistema corresponden a sistemas agrofo-

Table 1. Comparative summary of both types of agroecosystems.

Cuadro 1. Resumen comparativo de ambos tipos de agroecosistema.

Technological Aspects / Aspectos tecnológicos	Agroecosystems in Agroecological Transition / Agroecosistemas en transición agroecológica	Agroecosystems with Conventional Technology / Agroecosistemas con tecnología convencional
Structure / Estructura	Terraced agroforestry systems that include the year-round collection of insects, small mammals, fungi, and wild plants for local subsistence / Sistemas agroforestales sobre terrazas con recolección de insectos, mamíferos, hongos y arvenses para consumo local durante todo el año	Agroforestry systems on terraces with harvesting of insects, mammals, fungi, and weeds prior to agrochemical use / Sistemas agroforestales sobre terrazas con recolección de insectos, mamíferos, hongos y arvenses antes del uso de agroquímicos
Land preparation for sowing / Preparación del terreno para la siembra	Mechanized tillage using tractors and teams of oxen and horses / Labranza mecanizada con tractor y yunta de bovinos y equinos.	Mechanized tillage using tractors / Labranza mecanizada con tractor.
Crop diversity in agroecosystems / Diversidad de cultivos en los agroecosistemas	Maize intercropped and rotated with beans, fava beans, squash, Baby's Breath, *cempasúchil* flower, and other species. Mosaic landscape / Maíz asociado y en rotación con frijol, haba, calabaza, flor nube, flor de cempaxúchitl y otros. Paisaje de mosaicos.	Maize monoculture rotated mainly with wheat and occasionally with beans, fava beans, and squash / Monocultivo de maíz en rotación principalmente con trigo y Ocasionalmente con frijol, haba y calabaza
Crop fertilization / Fertilización de cultivos	Annual manuring and residue recycling. Application of 1–2.5 $t \cdot ha^{-1} \cdot year^{-1}$ of solid organic fertilizers and 200–1000 $L \cdot ha^{-1} \cdot year^{-1}$ of liquid fertilizers and other biostimulants / Anual estercolamiento y reciclaje de residuos. De 1-2.5 $t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$ de abonos orgánicos sólidos y 200-1000 $L \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$ de abonos líquidos y otros bioestimulantes.	200-750 $kg \cdot ha^{-1} \cdot yr^{-1}$ of urea applied in two doses and 100-250 $kg \cdot ha^{-1} \cdot yr^{-1}$ of DAP applied once. Occasional manuring and residue recycling / 200-750 $kg \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$ de urea en dos aplicaciones y 100-250 $kg \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$ de DAP en una aplicación. Ocasional estercolamiento y reciclaje de residuos.
Competitor control: weeds, pests, and diseases / Control de competidores: arvenses, plagas y enfermedades	Mechanical weed control. Preparation and application of plant- and mineral-based formulations, attractants, and entomopathogens for the natural control of pests and diseases. / Control mecánico de arvenses. Elaboración y aplicación de preparados vegetales y minerales, atrayentes y entomopatógenos para el control natural de plagas y enfermedades.	Use of herbicides such as 2,4-D and atrazine, applied alone or in combination, at rates of 1kg or 1-1.5 l per ha. Application of pesticides including cypermethrin, chlorpyrifos ethyl, permethrin, and carbofuran. / Uso de herbicidas como 2,4-D y atrazina solos o mezclados. En 1kg o de 1-1.5 l por hectárea. Aplicación de pesticidas como cipermetrina, clorpirifos etil, permetrina y carbofuran.
Harvest and yields / Cosecha y rendimientos	Plants are harvested progressively as they reach maturity. The average yield is 2 $t \cdot ha^{-1}$, and under favorable rainfall conditions, it can reach up to 3.5 $t \cdot ha^{-1}$. / Las plantas se amogotan para cosecharse paso a paso. El rendimiento promedio es de 2 $t \cdot ha^{-1}$ y, con buen temporal, se alcanzan 3.5 $t \cdot ha^{-1}$.	Harvesting is mechanical, carried out in November and December. The average yield is 4 $t \cdot ha^{-1}$ and under favorable rainfall conditions, it can reach up to 7 $t \cdot ha^{-1}$. / La cosecha es mecánica en noviembre y diciembre. El rendimiento promedio es de 4 $t \cdot ha^{-1}$ y, con buen temporal, se alcanzan hasta 7 $t \cdot ha^{-1}$.
Use of wild plants and fauna through harvesting / Aprovechamiento de arvenses y fauna mediante la recolección	Forage weeds and crop residues are used as fodder in animal enclosures. Various quelites, edible fungi, and insects are consumed. Seasonal utilization by 100% of households. / Arvenses forrajeras y rastrojos para corrales. Consumo de diversos quelites, hongos e Insectos comestibles. Aprovechamiento según temporada por el 100 % de familias.	Only 50 % of farmers utilize similar resources, and only before applying pesticides. / Solo el 50 % de los agricultores aprovechan recursos similares solo antes de aplicar pesticidas.

In both agroecosystems, forage resources such as the green tips of maize plants (also called "tazol"), forage weeds, and dry crop residues are utilized. These resources are harvested and transported to feed family livestock (sheep, horses, and cattle) in pens and, occasionally, after harvest, the resources are used directly in the field when animals are brought to graze.

Other components include wild species collected from soil ridges of terraces and, sometimes, within the cultivation area. Producers identified fungi such as *cempamil*, *huitlacoche*, *llanero*, and *orejas de puerco*; insect species such as *chinicuil*, maguey worm, and grasshopper; and various *quelites* including *ajenjo*, *amamaxtle*, *apipizco morado*, *cedrón*, *cochinitos* or *tlayayotes*, *cuaresmera*, *epazote de zorrillo*, *estafiate*, squash flower, *chilacayote* flower, squash vines, fennel, *huauzontle*, *jaltomate*, *jaramao*, cow tongue plant, *lengüitas*, mallow, turnip, *nopal chamacuero*, *nopal tapona*, *palo dulce*, *pericón*, gray *quelite*, *quintonil*, maguey flower stalk (*quiote*), *tlanoshtles*, and purslane. This diversity of utilized species corresponds with previous reports by Fernández-González (2021).

There are differences in the use of these wild resources. All producers within agroecosystems in agroecological transition consume them, whereas only 50 % of farmers in conventional agroecosystems collect them—and only prior to pesticide application—due to perceived health risks. Additionally, they report that the abundance of these resources tends to decline.

The described structure of both types of agroecosystems corresponds to the traditional agroforestry system known as *metepantles* or *metepancles* (Moreno-Calles et al., 2013; Méndez-Cervantes, 2022). Specifically, Moreno-Calles et al. (2013) report that, in recent interviews, farmers in Tlaxcala refer to *metepantle* as the combination of the planting terrace and the soil ridge, where succulent, woody, and semi-woody species are established to prevent soil erosion. The plant species found on soil ridges (whether planted, promoted, or tolerated) in both agroecosystems evaluated coincide with those reported by Moreno-Calles et al. (2013). Additionally, Magdaleno-Miranda et al. (2005) identified this agroforestry system as "trees in cultivated fields," characterized by the presence of woody species and the observation that the sur-

restales de más de 60 años de antigüedad, ya que, tanto en los bordos, como en linderos y caminos, se cuenta con árboles forestales (cedro blanco, ocote, tepozán, encinos, sabinos, oyamel), frutales (capulín, manzana, tejocote, pera, durazno, ciruelo, níspero, aguacate, nogal, piñón, membrillo), plantas arbustivas (jarilla, palo dulce, escobilla), maguey pulquero y nopal. Esta diversidad coincide con la lista de vegetación reportada por Pérez-Sánchez (2014).

En ambos agroecosistemas se aprovechan recursos forrajeros como las puntas de la planta de maíz en verde (también llamado "tazol"), arvenses forrajeras y los rastrojos secos. Estos recursos se cosechan y transportan para alimentar al ganado familiar (ovinos, equinos y bovinos) en corrales y, en ocasiones, tras la cosecha, los recursos se utilizan directamente en la parcela cuando se llevan los animales a pastar.

Se presentan otros componentes como las especies silvestres que se recolectan en bordos de las terrazas y, en ocasiones, dentro del área de cultivo. Los productores identificaron que dentro del cultivo y en la vegetación circundante se encuentran hongos como cempamil, huitlacoche, llanero, orejas de puerco; especies de insectos como el chinicuil, gusano de maguey, chapulín; y diversos quelites como: ajenjo, amamaxtle, apipizco morado, cedrón, cochinitos o tlayayotes, cuaresmera, epazote de zorrillo, estafiate, flor de calabaza, flor de chilacayote, guías de calabaza, hinojo, huauzontle, jaltomate, jaramao, lengua de vaca, lengüitas, malva, nabo, nopal chamacuero, nopal tapona, palo dulce, pericón, quelite cenizo, quintonil, quiote de maguey, tlanoshtles, verdolaga. Esta diversidad de especies aprovechadas coincide con lo reportado por Fernández-González (2021).

Existen diferencias en el aprovechamiento de estos recursos silvestres, ya que todos los productores de agroecosistemas en transición los consumen; en cambio, solo el 50 % de los agricultores de agroecosistemas convencionales los recolecta antes de aplicar los pesticidas, debido a que identifican riesgos para la salud. Además, indican que la abundancia de estos recursos tiende a disminuir.

La estructura mencionada de ambos tipos de agroecosistemas corresponde al sistema agroforestal tradicional denominado "metepantles" o "metepancles" (Moreno-Calles et al., 2013 y Méndez-Cervantes, 2022).

rounding vegetation facilitates the exchange of species with soil ridges.

This structure enables the provision of a range of agroecosystem services, including food, forage, timber, and medicinal resources. Additionally, producers acknowledged that it facilitates soil and moisture retention. These soil ridges also function as living barriers that can help contain pests and reduce the impact of wind on crops

Functioning of Agroecosystems

The characterization of agroecosystem functioning is based on a comparative description of the cultural practices reported by interviewees for both types of agroecosystems.

Land Preparation for Planting. In all agroecosystems (both conventional and those in agroecological transition), mechanized tillage with a tractor is practiced, consisting of plowing, harrowing, and planting. Pre-emergent herbicides are applied before sowing only in certain cases within the conventional model. In agroecosystems in transition, an additional practice known as *"la segunda"* is carried out, which involves a second pass with a harrow pulled by a team of oxen or horses.

Crop Diversity in Agroecosystems. In 100 % of the conventional agroecosystems, hybrid maize is grown under monoculture and in rotation, primarily with wheat; in a few cases, it is rotated with fava beans or common beans. In contrast, agroecosystems in agroecological transition cultivate native (criollo) maize in association (in *milpa*) with beans, squash, *cempasúchil* flower, and baby's breath. Crop rotation is carried out with one or more of the following: beans, fava beans, oats, barley, and tomato, resulting in a mosaic crop landscape.

Corp fertilization. In both types of agroecosystems, at least two applications of fertility management inputs were applied. In conventional agroecosystems, 60 % of farmers apply between 100 and 250 kg·ha^{-1} of diammonium phosphate (18-46-00 or DAP) in combination with urea at rates ranging from 200 to 400 kg·ha^{-1} at the time of sowing. The second fertilization is conducted using only urea, in amounts ranging from 100 to 350 kg· ha^{-1}. Additionally, 15 % of producers apply ammonium phosphate nitrate (31-

Particularmente, Moreno-Calles et al. (2013) reportan que, en entrevistas recientes, encontraron que los campesinos de Tlaxcala denominan metepantle al conjunto del espacio de un bancal para la siembra de cultivos y el bordo en donde se establecen especies suculentas, leñosas y semi-leñosas para prevenir la erosión del suelo. Las especies vegetales detectadas en los bordos (sembradas, promovidas o toleradas) de los dos agroecosistemas evaluados coinciden con lo reportado por Moreno-Calles et al. (2013). Por su parte, Magdaleno-Miranda et al. (2005) identificaron este sistema agroforestal como "árboles en terrenos de cultivo" con la presencia de especies leñosas y con la particularidad de que encontraron que la vegetación circundante permite el intercambio de especies con los bordos.

La estructura en cuestión permite la obtención de una serie de servicios agroecosistémicos como recursos alimenticios, forrajeros, maderables y medicinales. Además, los productores reconocieron que esta estructura facilita la retención de humedad y del suelo. Asimismo, sirven como barreras vivas que pueden contener plagas y disminuir los efectos del viento sobre los cultivos.

Funcionamiento de los agroecosistemas

La caracterización del funcionamiento de los agroecosistemas está basada en la descripción comparativa de las labores culturales reportadas por los entrevistados para ambos tipos de agroecosistemas.

Preparación del terreno para la siembra. En todos los agroecosistemas (convencionales y en transición agroecológica) se practica la labranza mecanizada con tractor, que consiste en barbecho, rastreo y siembra. Solo en algunos casos del modelo convencional se aplican herbicidas preemergentes (antes de la siembra). En agroecosistema en transición se realiza "la segunda", que consiste en otro paso de rastra con yunta de bueyes o caballos.

Diversidad de cultivos en los agroecosistemas. En el 100 % de los agroecosistemas convencionales se siembra maíz híbrido bajo monocultivo y en rotación, principalmente con trigo; en pocos casos se rota con haba o frijol. En contraste, en los agroecosistemas en transición agroecológica se siembra maíz criollo en asociación (en milpa) con frijol, calabaza, flor de cempaxúchitl, flor nube. La rotación se realiza con alguna

04-00) during the second application. Ten percent use 200 kg of a 21-17-03 formulation enriched with sulfur, magnesium, and zinc. The remaining farmers use custom mixtures containing unspecified potassium sources. In 70 % of conventional agroecosystems, all or part of the crop residues are recycled through tillage, and in 45 % of them, manure is occasionally applied.

Unlike the previous case, in agroecosystems undergoing agroecological transition, 100 % of farmers apply 200 to 1 000 L of worm leachate or bioferments and frequently recycle all or part of the crop residues. Eighty-five percent apply manure, mainly from sheep, but also from cattle, poultry, goats, and rabbits, in unspecified amounts and at varying intervals. Thirty percent also apply 1 to 2.5 t·ha^{-1} of bocashi or vermicompost. Additionally, 15 % combine organic inputs with DAP and urea, or with urea alone.

Competitor control: Weeds, pests and diseases. One hundred percent of farmers using conventional management apply pesticides. They mainly use herbicides with the active ingredients 2,4-D and atrazine (at doses of 1 kg or 1–1.5 L per hectare, as appropriate), or a mixture of both. They also apply cypermethrin, chlorpyrifos-ethyl, permethrin, and carbofuran to control grasshoppers (*Sphenarium purpurascens*) and white grubs (*Phyllophaga rubella*).

In agroecosystems undergoing agroecological transition, weed management is carried out manually or mechanically (weeding and second using tractor or oxen). Phytosanitary management involves organic inputs such as plant-based preparations, attractants, and entomopathogens, as well as inputs that strengthen the plant, including bioferments (supermagro and biodigester effluent), fish and worm leachates, mountain microorganisms, sodium silicate solution, and sulfur–lime broth. The quantity of inputs applied varies widely, depending on the presence and infestation level of potential pests or diseases. For preventive purposes, doses range from 5 to 10 L·ha^{-1}. For control stages, doses increase to 20 L·ha^{-1}, applied in two or more treatments during the crop cycle.

Harvest and yields. In the conventional model, harvesting is mechanical and takes place in November and December, once the grain is dry, according to farmers' criteria. The average yield is 4 t·ha^{-1} and depends on moisture availability during the grow-

de las siguientes opciones: frijol, haba, avena, cebada y tomate, creando un paisaje de mosaicos de cultivos.

Fertilización de cultivos. En ambos tipos de agroecosistemas se realizan al menos dos aplicaciones de insumos para el manejo de la fertilidad. En los agroecosistemas convencionales, el 60 % de los agricultores aplica de 100 a 250 kg·ha^{-1} de fosfato diamónico (18-46-00 o DAP) en combinación con urea en cantidades que van de 200 a 400 kg·ha^{-1} durante la siembra. La segunda fertilización se realiza solo con urea en un rango de 100 a 350 kg·ha^{-1}. El 15 % de los productores realiza el segundo abonado con fosfonitrato (31-04-00). El 10 % utiliza 200 kg de 21-17-3 con adición de azufre, magnesio y zinc. El resto de los productores hace mezclas con fuentes potásicas no especificadas. En el 70 % de agroecosistemas convencionales se recicla todo o parte del rastrojo mediante la labranza y en el 45 % de ellos se aplica estiércol de manera ocasional.

A diferencia de lo anterior, en los agroecosistemas en transición agroecológica, el 100 % de los agricultores aplica de 200 a 1 000 L de lixiviado de lombriz o bioles, y recicla todo o parte del rastrojo de manera frecuente; el 85 % de ellos aplica estiércol principalmente de ovino (pero también de bovinos, aves, cabras y conejos) en cantidades no especificadas y en diferente periodicidad; el 30 % también aplica de 1 a 2.5 t·ha^{-1} de bocashi o lombricomposta. Además, el 15 % de ellos combina los insumos orgánicos con DAP y urea, o solo con urea.

Control de competidores: Arvenses, plagas y enfermedades. El 100 % de los agricultores con manejo convencional emplea pesticidas. Utilizan principalmente herbicidas con los ingredientes activos 2,4-D y atrazina (en dosis de 1 kg o de 1-1.5 L por hectárea, según corresponda) o una mezcla de ambos ingredientes. Asimismo, aplican cipermetrina, clorpirifos etil, permetrina, carbofurán, para controlar chapulín (*Sphenarium purpurascens*) y gallina ciega (*Phyllophaga rubella*).

Por su parte, en los agroecosistemas en transición agroecológica se realiza el manejo de arvenses de forma manual o mecánica (escarda y segunda con tractor o yunta). El manejo fitosanitario se realiza mediante insumos orgánicos como preparados vegetales, atrayentes y entomopatógenos, así como opciones para fortalecer la planta como bioles (supermagro y efluente de biodigestor), lixiviado de pescado y de lombriz, microorganismos de montaña, agua de vidrio, y caldo sulfocálcico. La cantidad de insumos apli-

ing season. In years with favorable rainfall, yields may reach up to 7 t·ha^{-1}. The highest recorded yields match those reported by Galvis-Spindola (1990) and Sánchez-Morales & Romero-Arenas (2018), who found that the maximum achievable yield under good rainfall conditions is up to 7 t·ha^{-1} of maize. These results differ from those reported by INIFAP (2021), which cites maximum yields of around 3.5 t·ha^{-1}.

In the agroecological model, plants are heaped in the field to dry and are harvested gradually, according to the family's needs and the grain's moisture content. Mechanical shellers are sometimes used. The average yield is 2 t·ha^{-1}, with a maximum of 3.5 t·ha^{-1} in years with favorable rainfall.

The technological features described for both types of agroecosystems confirm the findings of Damián-Huato et al. (2010) and INIFAP (2021), indicating that this is peasant agriculture with low levels of mechanization. Peasants combine conventional agricultural technologies, traditional practices, and agroecological innovations with certain trends. For example, agroecological agriculture, also called peasant agriculture by Damián-Huato et al. (2007), is characterized by the use of native maize, crop association and rotation, manure application, and soil conservation. In contrast, the conventional model prioritizes the use of improved seeds, chemical fertilizers, and pesticides. Both models employ mechanization, crop rotation, residue recycling, and manure application. In recent years, the agroecological transition model has promoted nutrient recycling through the production and use of solid and liquid organic fertilizers derived from available residues, as well as the preparation and application of plant and mineral extracts for competitor management.

The results indicate that agroecosystems in agroecological transition originate from peasant agriculture models with a tendency toward conventional technology (monocultures with improved seeds, chemical inputs, and mechanization). They reintegrate traditional technology (manure use, crop associations and rotations, and animal traction) and incorporate agroecological innovations such as replacing agrochemicals with bioinputs and redesigning the agroecosystem through diversification of associations and rotations, as well as the utilization of gathered and household resources. As Tittonell (2015) notes,

cados es muy variable, pues depende de la presencia y nivel de infestación de organismos potencialmente plaga o enfermedad. En el nivel preventivo las cantidades van de 5 a 10 L·ha^{-1} y para etapas de control se incrementa a 20 L·ha^{-1} en dos o más aplicaciones durante el ciclo de cultivo.

Cosecha y rendimientos. En el modelo convencional, la cosecha es mecánica durante los meses de noviembre y diciembre, cuando el grano ya está seco, según el criterio de los productores. El rendimiento promedio es de 4 t·ha^{-1} y depende de la disponibilidad de humedad durante el ciclo agrícola, por lo que en años de buen temporal se pueden alcanzar hasta 7 t·ha^{-1}. Los rendimientos máximos alcanzados coinciden con los reportados por Galvis-Spindola (1990) y Sánchez-Morales & Romero-Arenas (2018), quienes encontraron que el rendimiento máximo alcanzable en condiciones de buen temporal es de hasta 7 t·ha^{-1} de maíz, y difieren con lo establecido por INIFAP (2021), que reporta máximos cercanos a las 3.5 t·ha^{-1}.

En el modelo agroecológico las plantas se amontonan en forma de mogote, para que se sequen en el campo, y se cosechen paulatinamente según las necesidades de la familia y el estado de humedad del grano. En ocasiones, también se recurre a la desgranadora mecánica. El rendimiento promedio es de 2 t·ha^{-1} y se alcanza un máximo de 3.5 t·ha^{-1} en años con buen temporal.

Los rasgos tecnológicos descritos para ambos tipos de agroecosistemas confirman lo establecido por Damián-Huato et al. (2010) e INIFAP (2021) en el sentido de que se trata de una agricultura campesina con baja tecnificación. Asimismo, se observa que los agricultores combinan tecnologías de la agricultura convencional, de la tecnología tradicional e innovaciones agroecológicas con ciertas tendencias. Por ejemplo, en la agricultura agroecológica, también llamada agricultura campesina por Damián-Huato et al. (2007), se caracteriza por el uso de maíz criollo, la asociación y rotación de cultivos, el uso de estiércol y la conservación de suelos, mientras que el modelo convencional privilegia el uso de semillas mejoradas, fertilizantes químicos y pesticidas. Ambos modelos recurren a la mecanización, la rotación de cultivos, el reciclaje de residuos y el estercolamiento. En los últimos años, el modelo de transición agroecológica ha promovido el reciclaje de nutrimentos mediante la elaboración y aprovechamiento de abonos orgánicos sólidos y líqui-

agroecological transitions are also aimed at restoring ecosystem functions after disturbance by recovering ancestral practices and incorporating innovations designed to improve efficiency and productivity.

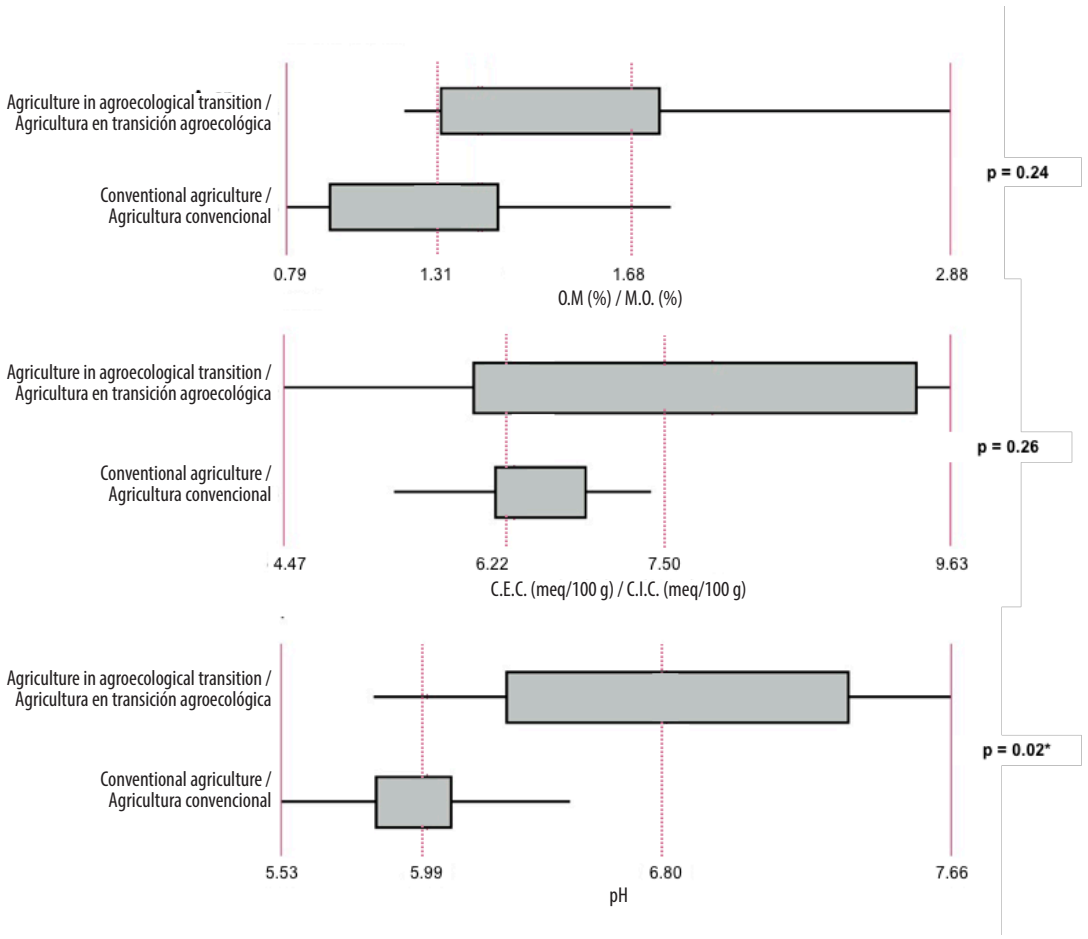
Physical and chemical soil conditions. In both types of agroecosystems, the organic matter content is moderately low. However, in agroecosystems under agroecological transition, the OM content is slightly higher than in conventional systems, with averages of 1.68 % and 1.31 %, respectively, although the difference is not statistically significant (Figure 1). In transitional agroecosystems, values reach up to 2.88 %,

dos a partir de residuos disponibles, así como la obtención y aplicación de extractos vegetales y minerales para el manejo de competidores.

Los resultados indican que los agroecosistemas en transición agroecológica parten de modelos de agricultura campesina con tendencia a la tecnología convencional (monocultivos con semillas mejoradas, insumos químicos y mecanización), reincorporan tecnología tradicional (uso de estiércol, asociaciones y rotaciones y tracción animal) e incorporan innovaciones agroecológicas como la sustitución de agroquímicos por bioinsumos y el rediseño del agroecosistema mediante la di-

Figure 1. Comparison of soil properties: organic matter, cation exchange capacity, and pH in two types of agroecosystems.

Figura 1. Comparación de las propiedades del suelo: Materia orgánica, Capacidad de Intercambio Catiónico y pH en dos tipos de agroecosistemas.



NOTE: The whiskers represent minimum and maximum values; the boxes represent the 25th–75th percentile range; the dotted lines indicate the mean values. The Mann–Whitney U test was used to detect differences between the parameters analyzed ($P < 0.05$*).

NOTA: Los bigotes representan los valores mínimos y máximos, los recuadros representan rangos del 25-75 %, las líneas punteadas representan las medias. Se utilizó la prueba U de Mann-Whitney para detectar diferencias entre los parámetros examinados ($P < 0,05$*).

which is attributed to the incorporation of manure, recycling of crop residues, and compost application. This increase in OM is important, as it enhances the retention of potentially toxic elements (PTEs) in the soil (Alloway, 2013) and reduces their bioavailability (Rashid et al., 2023).

The pH in the surface soil layer of conventional agroecosystems is moderately acidic, with an average value of 5.99. In contrast, agroecosystems in transition exhibit a neutral pH, with an average value of 6.76, which was statistically different (Figure 1). This difference is relevant, as pH values closer to neutrality prevent the formation of available forms of PTEs, thereby reducing their uptake by crops (Alloway, 2013; Rashid et al., 2023). Therefore, the application of agroecological practices could help prevent contamination of harvested and consumed products by these elements.

The cation exchange capacity (CEC) in the surface soil layer of both types of agroecosystems is low, consistent with the loam texture reported by the laboratory. As with organic matter and pH, CEC is higher in agroecosystems in transition compared to conventional ones, with average values of 7.50 and 6.22 $Cmol \cdot kg^{-1}$, respectively, although the difference was not statistically significant (Figure 1).

In summary, the higher organic matter content, neutral pH, and greater cation exchange capacity in the soil of agroecosystems in transition provide better conditions to buffer the effects of PTEs on food production, compared to soil conditions in conventional agroecosystems.

Potentially Toxic Elements (PTEs) in Agroecosystems

The laboratory report indicated that in the 20 sampled sites, the concentrations of As, Cd, and Be were below the practical quantification limits of the analytical methods used. Therefore, these elements are either absent or present in very low concentrations in the study area. As a result, there is no risk of contamination from these PTEs. These findings differ from those reported by Castro-González et al. (2019), who found As and Cd concentrations of 5.3 and 1.2 $mg \cdot kg^{-1}$, respectively, in the south-central area of the watershed. It is also possible that these agroecosystems are not the source of Cd and As previously identified as health risks in biomonitoring studies conducted by CONAHCYT (2023).

versificación de asociaciones y rotaciones, así como el aprovechamiento de recursos de recolección y casa. Como lo indica Tittonell (2015) las transiciones agroecológicas también están orientadas a restaurar funciones después de una perturbación a partir de la recuperación de prácticas ancestrales y a incorporar innovaciones dirigidas a mejorar eficiencia y productividad.

Condiciones físicas y químicas del suelo. En ambos tipos de agroecosistemas, el porcentaje de MO es moderadamente bajo, sin embargo, en los agroecosistemas en transición agroecológica el contenido es ligeramente mayor que en los convencionales con promedio de 1.68 y 1.31 respectivamente, aunque sin diferencias significativas (Figura 1). En los agroecosistemas en transición se presentan valores que alcanzan hasta el 2.88 % lo que responde a la incorporación de estiércol, el reciclaje de los residuos de cosecha y la aplicación de compost. Este incremento de MO es importante, porque facilitan una mayor retención de EPT dentro del suelo (Alloway, 2013) y reducen su biodisponibilidad (Rashid et al., 2023).

El pH en la capa superficial del suelo en los agroecosistemas convencionales es moderadamente ácido, con un valor promedio de 5.99. En contraste, en los agroecosistemas en transición, el pH se califica como neutro con un valor promedio de 6.76, lo que fue estadísticamente diferente (Figura 1). Esta diferencia es relevante, ya que valores de pH más cercanos a la neutralidad previenen la generación de formas disponibles de EPT, reduciendo en consecuencia la absorción por los cultivos (Alloway, 2013; Rashid et al., 2023). Por lo anterior, la aplicación de prácticas agroecológicas podría prevenir la contaminación, por estos elementos, de productos cosechados y aprovechados.

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) en la capa superficial del suelo de ambos tipos de agroecosistemas es baja, en concordancia con la textura franca reportada por el laboratorio. Tal y como ocurre con la MO y el pH, la CIC es más alta en agroecosistemas en transición en comparación con los convencionales cuyos valores ($Cmol \cdot kg^{-1}$) en promedio son 7.50 y 6.22 respectivamente, aunque no se encontraron diferencias significativas (Figura 1).

En conjunto, las condiciones de mayor contenido de MO, pH neutro y mayor valor de CIC en el suelo de agroecosistemas en transición, confieren mejores posibilidades de amortiguar el efecto de EPT sobre la pro-

The PTEs Ni, Co, Ba, Cr, Pb, Al, and Si were detected in all agroecosystems at concentrations above the practical quantification limits. However, the concentrations of the first five elements were well below the Maximum Allowable Concentrations established by both national and international standards. Therefore, according to the guidelines of the Mexican Standard (SEMARNAT, 2007), no remediation actions are required (see Table 2). The concentrations recorded are similar to those reported by Castro-González et al. (2019), except for Co, which was slightly higher (by one part per million). Given the low Pb concentrations found in the surface layer of the agroecosystems, compared to the MAC values set by national and international regulations, it can be concluded that agricultural soils are not the source of Pb exposure in individuals with chronic kidney disease, as reported by CONAHCYT (2023).

No MAC standards were identified at the national or international level for silica and aluminum. Therefore, the report by the Oregon Division of Occupational Safety and Health (n.d.) was consulted. This report indicates health risks for workers exposed to soil residues, minerals, and construction materials containing crystalline Si above 0.1 % (1000 mg·kg^{-1}). However, the results obtained (Figure 3) do not exceed this threshold, indicating no health risks and no need for soil remediation measures.

Regarding aluminum, the Environmental Protection Agency (EPA, 2023) states that accurately assessing its toxicity is difficult. Consequently, it recommends measuring soil pH as an alternative, since soluble forms of aluminum are toxic in soils with pH below 5.5. Therefore, aluminum content is not a concern, as the average pH of 5.99 is slightly acidic in conventional agroecosystem soils, and a pH of 6.76 is neutral in soils under agroecological transition. Only two conventional agroecosystems showed pH levels of 5.23 and 5.53, which could potentially contain soluble and toxic forms of aluminum.

The concentrations of each PTE showed no significant differences based on the type of agroecosystem (conventional or in agroecological transition) (Figures 2 and 3). Therefore, it can be assumed that the agroecosystems studied do not represent a source of PTEs associated with diseases in the population but rather provide safe food. As noted by Volke-Sepúlveda et al.

ducción de alimentos, en comparación con las condiciones del suelo en agroecosistemas convencionales.

Elementos potencialmente tóxicos (EPT) en los agroecosistemas

El informe del laboratorio indicó que en los 20 lugares muestreados la concentración de As, Cd y Be es inferior al límite de cuantificación práctico de los métodos utilizados para su determinación, por lo que no se encuentran en el área de estudio o están en concentraciones muy bajas. Por lo tanto, no hay riesgo de contaminación por esos EPT. Estos resultados difieren del reporte de Castro-González et al. (2019) quienes encontraron As y Cd en concentraciones de 5.3 y 1.2 mg•kg^{-1} respectivamente, en la zona centro sur de la cuenca. Asimismo, es posible que estos agroecosistemas no sean la fuente de Cd y As registrados como de riesgo para la salud en los biomonitoreos realizados por CONAHCYT (2023).

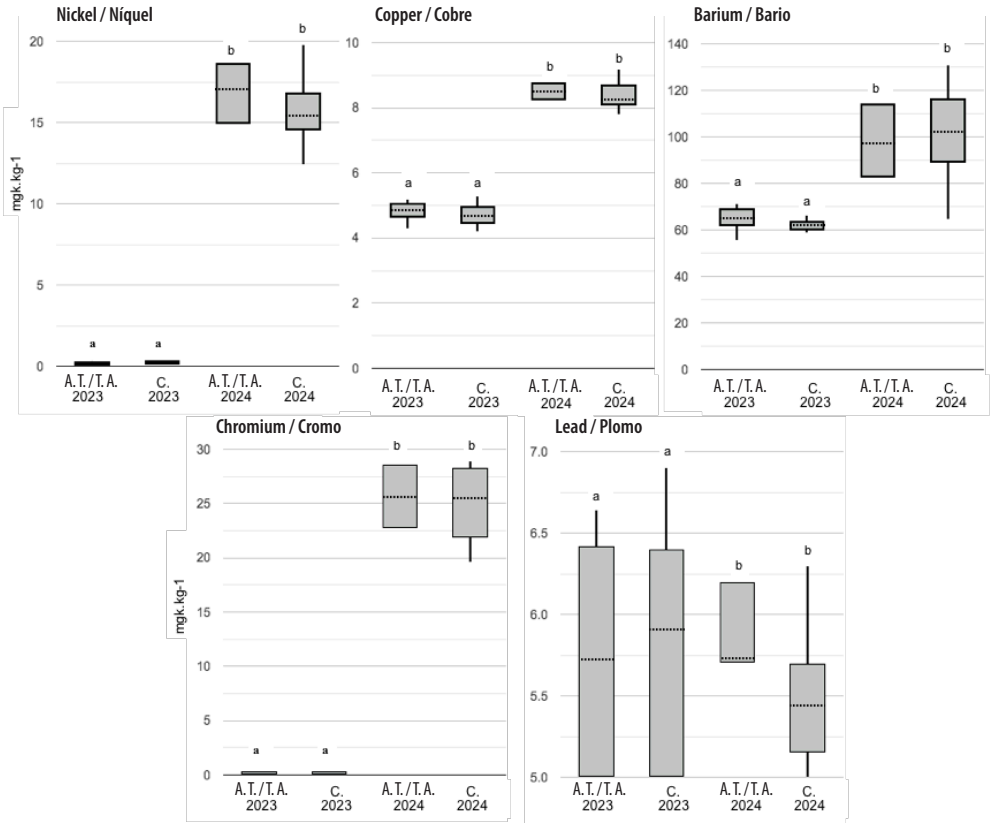
Los EPT Ni, Co, Ba, Cr, Pb, Al y Si se identificaron en todos los agroecosistemas en concentraciones superiores a los límites de cuantificación práctica. La concentración de los primeros cinco elementos se encuentra muy por debajo de las CMA establecidas por la normativa nacional e internacional. Por lo tanto, de acuerdo con los lineamientos de la Norma Mexicana (SEMARNAT, 2007) no se requieren acciones de remediación (Cuadro 2). Las concentraciones registradas son similares a las reportadas por Castro-González et al. (2019) y solo el Co se encuentra en mayor cantidad (en solo una parte por millón). Dado la baja concentración de Pb encontrada en la capa superficial de los agroecosistemas, comparada con los valores de CMA de la normatividad nacional e internacional, es posible indicar que el suelo agrícola no es la fuente de Pb en personas con enfermedad renal crónica reportada por CONAHCYT (2023).

No se identificaron normas de CMA, a nivel nacional e internacional, para la sílice y el aluminio. Por ello, se recurrió al reporte de la División de Seguridad y Salud Laboral de Oregón (s/f) en donde se indica que existen riesgos para la salud de los trabajadores que están expuestos a residuos de suelo, minerales y materiales de construcción con un contenido de Si cristalino superior a 0.1 % (1000 mg•kg^{-1}). No obstante, los resultados obtenidos (Figura 3) no superan esa cantidad máxima, lo que indica que no existen riesgos para la salud y que no se requieren medidas de remediación de suelos.

Table 2. PTE content (ppm) is soils from two types of maize agroecosystems.
Cuadro 2. Contenido de EPT (ppm) en suelos de dos tipos de agroecosistemas de maíz.

PTE / EPT	Agroecosystems (mean ± σ) / Agroecosistemas (media ± σ)				MAC according to the Mexican Standard / CMA de la Norma Mexicana	CMA According to International Standards / CMA normas internacionales
	Agroecological transition / En transición agroecológica		Conventional / Convencional			
Nickel / Níquel	5.79	±9.61	9.14	±8.11	1 600	30-100
Cobalt / Cobalto	6.06	±1.92	6.67	±1.91	-	25-50
Barium / Bario	76.51	±20.46	83.5	±27.18	5 400	-
Chromium / Cromo	8.75	±13.22	15.48	±12.33	280	50-200
Aluminum / Aluminio	6,316.31	±10,181.44	11,742.92	±10,986.31	-	-
Lead / Plomo	5.79	± 0.68	5.58	±0.59	400	50-500
Silicon / Silicio	78.40	±22.35	93.25	±44.50	-	-

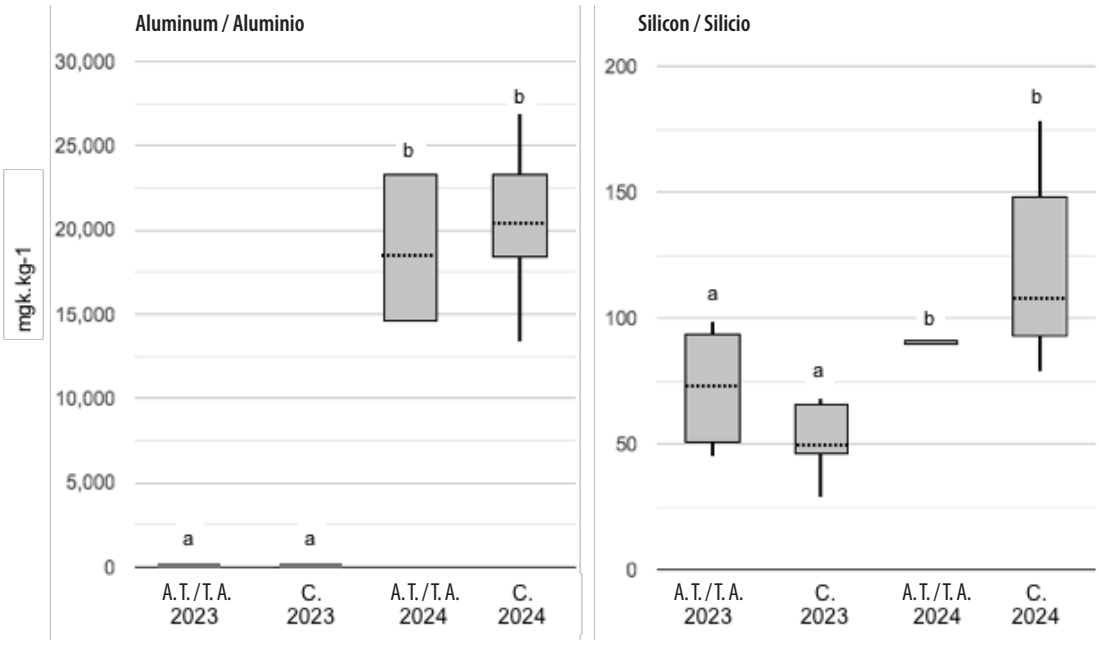
Figure 2. Box plots of Nickel, Copper, Barium, Chromium, and Lead concentrations in soils from two types of agroecosystems during two evaluation periods: 2023 and 2024.
Figura 2. Diagramas de caja de las cantidades de Níquel, Cobre, Bario, Cromo y Plomo presentes en suelo en dos tipos de agroecosistemas en dos periodos de evaluación: 2023 y 2024.



NOTE: Whiskers represent minimum and maximum values; boxes represent the 25–75 % range; dotted lines indicate means. The Mann-Whitney U test was used to detect differences. Different letters indicate significant differences at $P \leq 0.05$.
NOTA: Los bigotes representan los valores mínimos y máximos, los recuadros representan rangos del 25-75 %, las líneas punteadas represenan las medias. Se utilizó la prueba U de Mann-Whitney para detectar diferencias. Las letras distintas indican diferencias significativas con una $P \leq 0{,}05$.

Figure 3. Box plots of Aluminum and Silicon concentrations in soil in two types of agroecosystems during two evaluation periods: 2023 and 2024.

Figura 3. Diagramas de caja de las cantidades de Aluminio y Silicio presentes en suelo en dos tipos de agroecosistemas en dos periodos de evaluación: 2023 y 2024.



NOTE: Whiskers represent minimum and maximum values; boxes represent the 25–75 % range; dotted lines indicate means. The Mann-Whitney U test was used to detect differences. Different letters indicate significant differences at $P \leq 0.05$.

NOTA: Los bigotes representan los valores mínimos y máximos, los recuadros representan rangos del 25-75 %, las líneas punteadas representan las medias. Se utilizó la prueba U de Mann-Whitney para detectar diferencias. Las letras distintas indican diferencias significativas con una $P \leq 0{,}05$.

(2005) and Rodríguez-Eugenio et al. (2019), the seven PTEs found in this study occur naturally worldwide, and in no case do their levels exceed the limits established by current regulations due to anthropogenic activity.

Furthermore, there is agreement with the findings of INIFAP (2021) and Damián-Huato et al. (2007) regarding the characterization of the agricultural system as low-input (both chemical and organic). Therefore, the contribution of PTEs plays a minimal role in the accumulation process that could pose risks to human and environmental health (Martí et al., 2002; Dueñas-Rivadeneira e Intriago, 2022).

Another factor to consider is the input of PTEs through volcanic eruptions and wind-transported dust particles. Peasants reported the fallout of volcanic ash from emissions of the Popocatépetl volcano, especially in 2023 (also documented by CENAPRED, 2023), as well as the presence of dust caused by whirlwinds during the first half of each year. These events

En cuanto al aluminio, la Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés) (2023) indica que es difícil evaluar con precisión su toxicidad. En consecuencia, recomienda medir el pH del suelo como alternativa, dado que las formas solubles son tóxicas en suelos con pH inferiores a 5.5. Por lo tanto, el contenido de aluminio no es motivo de preocupación, ya que el pH medio de 5.99 es ligeramente ácido para los suelos de agroecosistemas convencionales y el pH, de 6.76, es neutro en suelos con agroecosistemas en transición agroecológica, excepto en dos agroecosistemas convencionales con niveles de pH de 5.23 y 5.53, que potencialmente podrían contener formas solubles y tóxicas de aluminio.

Las concentraciones de cada uno de los EPT no mostraron diferencias significativas según el tipo de agroecosistema (convencional o en transición agroecológica) (Figura 2 y 3). Por tanto, puede suponerse que los agroecosistemas evaluados no constituyen

may explain why the laboratory reported higher PTE concentrations (Figures 2 and 3) in the agroecosystems sampled in 2023. As Santamaría-Juárez et al. (2022) indicate, volcanic ash contains metals such as Cr, Fe, Zn, Mn, Mg, Cu, Ni, and other elements including Al and Si. Therefore, ash levels are a determining factor in the total amount of PTEs present in the area.

Despite this, the presence of PTEs—even at low soil concentrations—could allow bioaccumulation in plant and animal species incorporated into the family diet (Rodríguez-Eugenio et al., 2019). Thus, it is necessary to apply technologies aimed both at reducing contamination sources and increasing the soil's buffering capacity. In this regard, although no significant differences were observed between agroecosystem types, PTE levels were on average lower in agroecosystems under agroecological transition (Figures 2 and 3) and showed a greater soil buffering capacity. The potential to retain PTEs is attributed to the neutral pH and higher contents of organic matter and cation exchange capacity (CEC) compared to conventional agroecosystems. This results in a higher likelihood of PTE retention in the organic fraction and a lower rate of transformation into bioavailable forms.

Despite this, the presence of PTEs, even at low soil concentrations, could allow bioaccumulation in plant and animal species incorporated into the family diet (Rodríguez-Eugenio et al., 2019). Thus, it is necessary to apply technologies aimed both at reducing contamination sources and increasing the soil's buffering capacity. In this regard, although no significant differences were observed between agroecosystems, PTE levels were on average lower in agroecosystems under agroecological transition (Figures 2 and 3) and showed a greater soil buffering capacity. The potential to retain PTEs is attributed to the neutral pH and higher contents of organic matter and cation exchange capacity compared to conventional agroecosystems. This results in a higher likelihood of PTE retention in the organic fraction and a lower rate of transformation into bioavailable forms (Alloway, 2013; Rodríguez-Eugenio et al., 2019; Rashid et al., 2023).

Conclusions

Agroecosystems in Españita differ by the cultivated genetic resource and the type of input used for fertilization (synthetic or organic) and weed control. Con-

una causa de EPT asociada a enfermedades en la población, sino que son una fuente de alimentos sanos. Tal y como lo indican Volke-Sepúlveda et al. (2005) y Rodríguez-Eugenio et al. (2019), los siete EPT encontrados en este estudio se encuentran de manera natural como en cualquier lugar del planeta y en ningún caso se rebasan los límites establecidos por la normatividad vigente debido a la actividad antrópica.

Asimismo, existe consenso con los hallazgos de INIFAP (2021) y Damián-Huato et al. (2007) en cuanto a la caracterización del sistema agrícola como de bajos insumos (tanto químicos como orgánicos). Por lo tanto, el aporte de EPT juega un papel mínimo en el proceso de acumulación que puede poner en riesgo la salud humana y ambiental (Martí et al., 2002; Dueñas-Rivadeneira e Intriago, 2022).

Otro factor para considerar es la aportación de EPT a través de erupciones volcánicas y de partículas de polvo transportadas por el viento. Al respecto, los productores observaron la caída de ceniza volcánica proveniente de las exhalaciones del volcán Popocatépetl, sobre todo en el año 2023 (también reportada por CENAPRED, 2023) así como la presencia de polvo debido a remolinos durante el primer semestre de cada año. Es posible que estos hechos hayan sido la causa de que el laboratorio haya reportado concentraciones mayores de EPT (Figuras 2 y 3) en los agroecosistemas muestreados en 2023. Como lo indican Santamaría-Juárez et al. (2022) la ceniza está compuesta por metales como Cr, Fe, Zn, Mn, Mg, Cu, Ni y otros elementos como Al y Si. Por consiguiente, los niveles de cenizas son un factor determinante de la cantidad total de EPT presentes en la zona.

A pesar de lo anterior, la presencia de EPT, incluso en bajas concentraciones en el suelo, podría permitir la bioacumulación en especies vegetales y animales incorporadas a la dieta familiar (Rodríguez-Eugenio et al., 2019). Por lo tanto, es necesario aplicar tecnologías dirigidas tanto a reducir las fuentes de contaminación como a aumentar la capacidad de amortiguamiento del suelo. En este sentido, aunque no se observaron diferencias significativas entre los tipos de agroecosistemas, los EPT fueron en promedio más bajos en los agroecosistemas en transición agroecológica (Figuras 2 y 3) y presentaron una mayor capacidad de amortiguamiento del suelo. La posibilidad de retener los EPT se debe a que el pH es neutro y a que los contenidos de M.O. y C.I.C son mayores que en los agroecosistemas

ventional agroecosystems grow hybrid maize under monoculture conditions, using chemical fertilizers and pesticides. In contrast, agroecological transition systems grow native maize in association with other species, apply agroecological practices, and use organic products for fertilization and plant health, along with mechanical weed control. Both systems rely on mechanization for soil preparation, crop rotation, manure application, incorporation of crop residues, coexistence with woody species along ridges and edges, and, to varying degrees, the use of residues for forage and wild species for human consumption. Therefore, it can be concluded that both types of agroecosystems contain various elements of agroecological transition that can be further enhanced.

The data indicates that neither of the two agroecosystem types studied has a significant impact on the anthropogenic accumulation of potentially toxic elements. Of the ten elements analyzed by the laboratory, the concentrations of three (As, Cd, and Be) were below the practical quantification limit. Five elements (Ni, Co, Ba, Cr, and Pb) did not exceed the maximum acceptable concentrations established by current national and international regulations, and two elements (Si and Al) are not subject to regulatory standards.

Given the level of agroecological transition in the evaluated agroecosystems and the relatively short period (two to eight years) since the replacement of synthetic inputs with organic ones, it is not yet evident whether this shift has contributed to preventing soil contamination by anthropogenic accumulation of potentially toxic elements (PTEs). Similarly, there is a noticeable trend toward improved soil buffering capacity, influenced by organic matter content, cation exchange capacity, and pH levels in agroecological systems.

Based on the above, it is recommended to reassess the levels of agroecological transition in the agricultural production of the studied communities, to identify and enhance traditional agroecological practices related to agroforestry. These practices include increasing and diversifying plant cover along ridges and field edges, diversifying crop rotations, promoting interactions with livestock (such as manure use and the use of residues and weeds as forage), and producing

convencionales. Esto se traduce en una mayor probabilidad de retención de EPT en la fracción orgánica y menor tasa de transformación a formas biodisponibles (Alloway, 2013; Rodríguez-Eugenio et al., 2019; Rashid et al., 2023).

Conclusiones

Los agroecosistemas en Españita se diferencian por el recurso genético cultivado y el tipo de insumo utilizado para la fertilización (síntesis química u orgánica) y el control de competidores. Los agroecosistemas convencionales cultivan maíz híbrido en monocultivo con fertilización química y uso de pesticidas. En cambio, los agroecosistemas en transición agroecológica cultivan maíz criollo en asociación con otras especies, emplean prácticas agroecológicas y emplean productos orgánicos para la fertilización y el control fitosanitario, además, realizan control mecánico de arvenses. Ambos sistemas recurren a la mecanización para la preparación del suelo, la rotación de cultivos, el estercolamiento, la reincorporación de residuos de cosecha, la convivencia con especies lignarias en bordos y linderos y, en mayor o menor medida, el aprovechamiento de residuos para forraje y de especies silvestres para la alimentación humana. Por tanto, se puede concluir que en ambos tipos de agroecosistemas se encuentran diferentes elementos de transición agroecológica, las cuales pueden potenciarse.

Se puede afirmar que, con los datos generados, ninguno de los dos tipos de agroecosistema en cuestión ejerce una influencia significativa en la acumulación antropogénica de elementos potencialmente tóxicos. De los diez elementos analizados por el laboratorio, las concentraciones de tres de ellos (As, Cd y Be) están por debajo del límite práctico de cuantificación. Cinco elementos (Ni, Co, Ba, Cr y Pb) no superan las concentraciones máximas aceptables indicadas por las normativas nacionales e internacionales vigentes, y dos elementos (Si y Al) no disponen de normas para su regulación.

Dado el nivel de transición agroecológica de los agroecosistemas evaluados y el periodo de tiempo relativamente corto (de dos a ocho años) en el que se ha producido la sustitución de insumos de síntesis química por insumos orgánicos, aún no es evidente si ello ha repercutido en la prevención de la contaminación

and applying organic inputs derived from household and farm solid and liquid waste, among others.

The design of agroecosystem structure and function should aim to prevent soil contamination by potentially toxic elements from anthropogenic activities and to improve the buffering capacity of both the soil and the agroecosystem as a whole. This is essential to minimize the uptake and accumulation of potentially toxic elements in harvested products, as well as in the wide range of wild species that are gathered and used.

It is important to note that greater efforts are still needed to support the agroecological transition among families in the studied communities, to scale up this productive approach.

Finally, given the prevalence of human diseases linked to potentially toxic elements in the region, it is necessary to expand the number of cases studied and investigate other possible sources of these contaminants—such as applied pesticides, nearby water streams, and industrial, urban, and transportation activities—that contribute particulate matter, which is carried by wind and deposited through gravity and rainfall in the families' surroundings.

End of English version

del suelo por acumulación antropogénica de EPT. Del mismo modo, se identifica una tendencia de mejora en la capacidad de amortiguamiento del suelo, resultante de la influencia del contenido de materia orgánica, de la capacidad de intercambio catiónico y del valor de pH en los agroecosistemas agroecológicos.

Por lo anterior, se recomienda reconsiderar los niveles de transición agroecológica en la producción agrícola de las comunidades estudiadas, para identificar y maximizar las prácticas agroecológicas tradicionales relacionadas con la agroforestería. Dichas prácticas incluyen el incremento y la diversificación de la cobertura vegetal en bordos y linderos, la diversificación de las rotaciones, la promoción de interacciones con el componente animal (como el aprovechamiento del estiércol y el uso forrajero de residuos y arvenses), la producción y uso de insumos orgánicos a partir de residuos sólidos y líquidos del hogar y la parcela, entre otros.

El diseño de la estructura y el funcionamiento de los agroecosistemas debe orientarse a la prevención de la contaminación del suelo por elementos potencialmente tóxicos procedentes de actividades antropogénicas, así como a la mejora de la capacidad de amortiguación del suelo y del agroecosistema en su conjunto. Todo ello con el fin de minimizar la absorción y acumulación de elementos potencialmente tóxicos en los productos cosechados, así como en la extensa lista de especies silvestres recolectadas y aprovechadas.

Es necesario comentar que aún se requiere mayor esfuerzo en la gestión de la transición agroecológica entre las familias de las comunidades estudiadas, a fin de escalar esta opción productiva.

Finalmente, dada la prevalencia de enfermedades humanas asociadas a elementos potencialmente tóxicos en la región estudiada, es necesario ampliar el número de casos estudiados, así como investigar otras posibles fuentes de estos contaminantes como los pesticidas aplicados, las corrientes de agua cercanas, las actividades industriales, urbanas y de transporte, mismas que aportan material particulado, que son transportados por el viento y depositados por gravedad y, precipitaciones en el entorno de las familias.

Fin de la versión en español

References / Referencias

Alvarado-Cardona, M., Colmenero-Robles, J. A., & Valderrábano-Almegua, M. D. L. L. (2007). La erosión hídrica del suelo en un contexto ambiental, en el Estado de Tlaxcala, México. *Ciencia Ergo Sum, 14(3), 317-326*.

Alloway, B. J. (2013). *Sources of Heavy Metals and Metalloids in Soils*. En: Alloway, B. (ed.) Heavy Metals in Soils. Environmental Pollution (Vol. 22, pp. 11-50). Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-007-4470-7_2.

Belmonte-Serrato, F., Romero-Díaz, A., Alonso-Sarría, F., Moreno-Brotóns, J., & Rojo-López, S. (2010). Afección de suelos agrícolas por metales pesados en áreas limítrofes a explotaciones mineras del Sureste de España. *Papeles de Geografía, (51-52), 45–54*.

Castellanos J. Z., Uvalle B., J. X., & Aguilar S., A. (2000). *Manual de interpretación de análisis de suelos y aguas*. 2ª ed. Colección INCAPA. México.

Castro-González, N. P., Calderón-Sánchez, F., Moreno-Rojas, R. I, Tamariz-Flores, J. V., & Reyes-Cervantes, E. (2019). Nivel de contaminación de metales y arsénico en aguas residuales y suelos en la subcuenca del Alto Balsas en Tlaxcala y Puebla, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental, 35(2), 335-348*. https://doi.org/10.20937/rica.2019.35.02.06.

Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). (2023). Actividad del volcán Popocatépetl 2023. *https://www.cenapred.unam.mx/DatosAbiertos/Informe_Popocat%C3%A9petl_Anual_2023*.[Archivo PDF].

Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT). (2023). *1er Informe estratégico. Cuenca del alto Atoyac (Tlaxcala y Puebla): Región de Emergencia Sanitaria y Ambiental; Problemática Socioambiental y recomendaciones para su atención integral*. https://cdn.conahcyt.mx/enis/toxicologia/resa-atoyac/inicio/descargables/informe-caa.pdf.

Damián-Huato, M. A., Ramírez-Valverde, B., Parra-Inzunza, F., Paredes-Sánchez, J. A., Gil-Muñoz, A., López-Olguín, J. F., & Cruz-León, A. (2007). Tecnología agrícola y territorio: el caso de los productores de maíz de Tlaxcala, México. *Investigaciones Geográficas, (63)*, 36-55. https://doi.org/10.14350/rig.29909.

Damián-Huato, M. A., Ramírez-Valverde, B., Aragón-García, A., Huerta-Lara, M., Sangerman-Jarquin, D. M. de J., & Romero-Arenas, O. (2010). Manejo del maíz en el estado de Tlaxcala, México: entre lo convencional y lo agroecológico. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales, 6 (2), 67-76*.

Dueñas-Rivadeneira, J. P., & Intriago-Flor, F. G. (2022). Contenido de metales pesados (Cu, Pb, Ni, Cd) en abonos orgánicos y las materias primas para su elaboración. *La Técnica. Revista De Las Agrociencias*, 12(1), 62–67. https://doi.org/10.33936/la_tecnica.v0i27.3674.

Fernández-González, C. (2021). Reporte: *Diagnóstico agroecológico del Sistema Alimentario local de familias del Centro de Economía Social Julián Garcés A.C*. CONACYT. Centro de Economía Social Julián Garcés.

Flores-Domínguez, A. D., & Priego-Santander, A. G. (2021). Capítulo 2. *Caracterización físico-geográfica del paisaje en la microcuenca Atoyac-Xochiac, subcuenca Alto Balsas*. En: Ávila-Orta, C.A., Hernández-Rodríguez, M. de L., Lozano Morales S.A., (Coord.). *Río Atoyac: Hacia una gestión integral de una problemática multifactorial*. (pp. 55-80). El Colegio de Tlaxcala, A. C.

Galvis-Spindola, A. (1990). *Validación de las normas de fertilización de N y P estimado con un modelo simplificado para maíz, con las dosis obtenidas en la experimentación de campo*. [Tesis de Maestría en Ciencias, Colegio de Postgraduados]. México.

IBM SPSS. (2012). *Advanced Statistics 21* [software]. SPSS Inc.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2010). *Compendio de información geográfica municipal 2010. Españita, Tlaxcala*. https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/29/29012.pdf.

*I*nstituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). (2021). *Informe anual de actividades en el CIRCENTRO, 2021. Reporte Anual 2021 Ciencia y Tecnología para el Campo Mexicano.* https://www.gob.mx/inifap/documentos/reporte-anual-circe-tlaxcala-2021.

Magdaleno-Miranda, L., García-Moya, E., Valdéz-Hernández, J. I., & de la Cruz-Isidro, V. (2005). Evaluación del sistema agroforestal "árboles en terrenos de cultivo", en Vicente Guerrero, Tlaxcala, México. *Revista. Fitotecnia mexicana. 28* (3), 203-212. https://doi.org/10.35196/rfm.2005.3.203.

Martí L., Burba J., N., & Cavagnaro M. (2002). Metales pesados en fertilizantes fosfatados, nitrogenados y mixtos. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias, UNCuyo, 34*(2), 43-48.

Méndez-Cervantes, J. E. (2022). *Sistemas agroforestales con metepantle y sus aportes socioeconómicos a comunidades campesinas de Españita, Tlaxcala*. [Tesis de Maestría en Ciencias, Universidad Autónoma Chapingo]. Repositorio Chapingo. https://repositorio.chapingo.edu.mx/server/api/core/bitstreams/0b302d65-69ec-4477-9819-79cd0abf7228/content.

Méndez Serrano, A., Rosas Landa, O., Martínez Rodríguez, A., Galicia Alonso I., González Juárez, G., Olvera Carvajal, A. E., Rosado Zaidi, S. J., Hernández García, M. G., & López Santos, J. D., Lara Vázquez, A. (2017). *Síntesis de la Recomendación 10/2017 de la Comisión Nacional de Derechos Humanos (CNDH)*. Tlaxcala, México: Centro "Fray Julián Garcés", Derechos Humanos y Desarrollo Local A.C. https://www.centrofrayjuliangarces.org.mx/wp-content/uploads/2019/11/Recomendacion-Completo.pdf

Moreno-Calles A. I., Toledo, V. M., & Casas A. (2013). Los sistemas agroforestales tradicionales de México: Una aproximación biocultural. *Botanical Sciences, 91(4), 375-398*. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-42982013000400001&lng=es&tlng=es.

Oregon Occupational Safety & Health Division (Oregon OSHA). (s/f). *¡No se trata solo de polvo!. Qué debe saber acerca de la sílice cristalina, la silicosis y las normas sobre sílice de Oregon OSHA.* Sección de Normas y Recursos Técnicos de Oregon OSHA. https://osha.oregon.gov/edu/peso/Pages/default.aspx

Pérez-Sánchez, J. M. (2014). *Agricultura de Terrazas en Tlaxcala. La Caridad Cuaxonacayo. México*: Secretaría de Educación Pública del Estado de Tlaxcala.

Rashid, A., Schutte, B. J., Ulery, A., Deyholos, M. K., Sanogo S., Lehnhoff E. A., & Beck L. (2023). Heavy Metal Contamination in Agricultural Soil: Environmental Pollutants Affecting Crop Health. *Agronomy.; 13(6), 1521*. https://doi.org/10.3390/agronomy13061521.

Rodríguez R., J. (2015). Seguimiento de la transición con bases agroecológicas del diseño de un sistema Agroforestal de participación social: Finca Villabrojo (Ciudad Real). Máster Universitario Oficial de Agroecología, Desarrollo Rural y Agroturismo. Universitas Miguel Hernández. España

Rodríguez-Alfaro, M., Muñiz-Ugarte, O., Calero-Martín, B., Martínez-Rodríguez, F., Montero-Álvarez, A., Limeres-Jiménez, T., Orphee-Montoya, M., & de Aguilar- Accioly, A. M. (2012). Contenido de metales pesados en abonos orgánicos, sustratos y plantas cultivadas en organopónicos. *Cultivos Tropicales, 33(2), 05-12.*

Rodríguez-Eugenio, N., McLaughlin, M., & Pennock, D. (2019). *La contaminación del suelo: una realidad oculta*. FAO. https://openknowledge.fao.org/items/30b955f2-9989-4629-9782-b67dfa518841.

Ruiz-Huerta, E. A., Armienta-Hernández, Ma. A., Dubrovsky, J. G., & Gómez-Berna, J. M. (2022). Bioaccumulation of heavy metals and As in maize (*Zea mays* L.) grown close to mine tailings strongly impacts plant development. *Ecotoxicology 31:447–467*. https://doi.org/10.1007/s10646-022-02522-w.

Sánchez-Morales, P. y Romero-Arenas, O. (2018). Evaluación de la sustentabilidad del sistema milpa en el Estado de Tlaxcala, México. *Revista de El Colegio de San Luis, 8(15), 107–134*. https://doi.org/10.21696/rcsl8152018745.

Santamaría Juárez, J. D., Linares Ruíz, V., Castañeda Antonio, M. D., Ramírez-Guzmán, M. E., Juárez M., M., Velasco H., Á., Águila A., E., Munguía P. R., Rivera, A., & Báez R., A. (2022). *Caracterización fisicoquímica de material particulado del Popocatépetl, trayecto Atlixco-Puebla, y su impacto en la salud y el ambiente*. Acta universitaria, 32. https://doi.org/10.15174/au.2022.3489.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) (2007). *NORMA Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y vanadio*. Diario Oficial de la Federación. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4964569&fecha=02/03/2007#gsc.tab=0.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales & Colegio de Postgraduados (SEMARNAT-CP. (2002). *Evaluación de la Degradación de los Suelos Causada por el Hombre en la República Mexicana, a escala 1:250,000*. Memoria Nacional. México.

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2024). *Anuario Estadístico de la Producción Agrícola 2023*. http://www.siap.gob.mx.

Srivastava, V., Sarkar, A., Singh, S., Singh, P., De Araujo, A. S., & Singh, R. P. (2017). Agroecological responses of heavy metal pollution with special emphasis on soil health and plant performances. *Frontiers in Environmental Science, 5, 64*.

Tittonell, P. (2019). Las transiciones Agroecológicas: Múltiples escalas, niveles y desafíos. Rev. FCA UNCUYO 51(1):231-246. ISSN (en línea) 1853-8665.

Volke-Sepúlveda T., Velasco-Trejo J. A., & de la Rosa-Pérez D. A. (2005). *Suelos contaminados por metales y metaloides: muestreo y alternativas para su remediación*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología.