

Revista Digital, 2025



**USAC**  
TRICENTENARIA  
Universidad de San Carlos de Guatemala

CENTRO UNIVERSITARIO DE OCCIDENTE - CUNOC



# Kitzia

tercera edición



Revista de la División de  
Ciencia y Tecnología-CUNOC



# DIRECTORIO

**Director General Centro Universitario de Occidente:**

Dr. César Haroldo Milián Requena.

**Secretario Administrativo:**

MSc. José Edmundo Maldonado

**Director División de Ciencia y Tecnología:**

MSc. Imer Vinicio Vásquez Velásquez

**Coordinador Carrera de Agronomía:**

MSc. Ronal Alfaro Mérida

**Coordinador Carrera de Gestión Ambiental Local:**

MSc. Julio López Valdez

**Coordinador Carrera de Administración de Tierras:**

MSc. Hugo García



# EDITORIAL

Es para la División de Ciencia y Tecnología (CyT) del CUNOC un gran gusto compartir con la comunidad de la región VI del país éste No. 3 de la revista Kitzia del año 2025, número que incluye 9 artículos desarrollados por docentes e investigadores, egresados y tesis de las 3 carreras de la División de CyT que son:

- Ingeniería agronómica en sistemas de producción agrícola
- Ingeniería en gestión ambiental local
- Ingeniería en administración de tierras

Además es un honor contar con la participación de Docentes e investigadores de la Facultad de Agronomía de la USAC e investigadores del Centro Internacional de Estudios Políticos y Sociales, ambos investigadores identifican problemáticas y realizan propuestas de solución a la misma dando cumplimiento al mandato que tiene la Universidad de San Carlos de Guatemala (USAC).

Los temas abordados en este número se resumen en los siguientes temas:

- Recarga hídrica en contexto de cambio climático
- La ciencia y tecnología en la producción agrícola y el Manejo integrado de plagas
- Tratamiento de aguas
- Seguridad Alimentaria y Nutricional
- Problemática de la Cadena de valor de la miel
- Economía circular
- Desarrollo de ciudades intermedias y su impacto socio ambiental

No cabe duda que son temas de gran relevancia para nuestro país y principalmente el altiplano occidental de Guatemala, temas que se abordan en esta División de CyT desde las aulas de sus 3 carreras hasta en las investigaciones o trabajos de graduación, como un aporte a la sociedad guatemalteca desde la Universidad pública, ya que la problemática analizada busca contribuir de manera importante en la mejora de la calidad de vida de quienes habitamos éstos alrededores.

Gracias a los profesionales que contribuyeron con éste número 3 de la Revista Kitzia de la División de Ciencia y Tecnología del año 2025, se motiva al resto de docentes a que participen activamente en investigación además de actividades de docencia y así motivar a los estudiantes a que se involucren en el mundo de la ciencia y de la generación de conocimiento.

MSc. Imer Vinicio Vásquez Velásquez  
Director de la División de Ciencia y Tecnología

**"ID Y ENSEÑAD A TODOS"**



# ÍNDICE

Directorio	2
Editorial	3
índice	4
<b>Entre modelos e incertidumbre: Re imaginando la recarga hídrica en tiempos de cambio climático</b>	5
<b>Regionalización climática del valle de Quetzaltenango y para el cultivo de frutales caducifolios</b>	10
<b>Comparación de hierro, calcio, magnesio, fósforo y fibra en pastas convencionales y pastas con <b>sustitución parcial</b> de harina de trigo (<i>Triticum aestivum</i>) por harina de amaranto (<i>Amaranthus cruentus</i>), chía (<i>Salvia hispánica</i>) y bleado (<i>Amaranthus hybridus</i> L.), y su <b>aceptabilidad por consumidores</b></b>	16
<b>Implementación de MaxEnt en R para estimar la distribución potencial de <i>Oligonychus pratensis</i> en el cultivo de Maíz en Guatemala</b>	21
Problemas actuales en la <b>cadena de valor de la miel</b> en Guatemala	26
En <b>la era del consumismo</b> : Sostenibilidad y economía circular en el <b>sistema de embalaje y comercialización</b> de ARCLA Café	32
<b>Generación de residuos y desechos sólidos</b> domiciliarios y su gestión en el área urbana del municipio de Santa Cruz La Laguna, Sololá, Guatemala	36
<b>Evaluación De Tecnología</b> De Nanoburbujas Para La Reducción De Sólidos Disueltos y Turbidez, En Una Muestra Del Lago De Amatitlán, Guatemala	40
<b>El desarrollo</b> de ciudades intermedia	46
Invitación	50
Créditos	51
Agradecimientos	51

# Entre MODELOS e INCERTIDUMBRE:



Re imaginando la recarga hídrica en tiempos de cambio climático.

**Autores:** Wener Armando Ochoa Orozco y Bayron Geovany González Chavajay

## Sobre los autores:

**Wener Armando Ochoa Orozco:** Ing. Agr. (FAUSAC, 2007), MSc. en Gestión Ambiental (USAC, 2009), PhD. en Cambio climático y sostenibilidad (USAC, 2021).

**Bayron Geovany González Chavajay:** Ing. Agr. (FAUSAC, 2018), Postgrado en Hidrogeología (USAC, 2020).

## Resumen

Este estudio integra dos niveles complementarios. **i)** Una revisión comparativa de diez métodos de estimación de recarga, evaluados mediante matriz multicriterio (*coste de datos, escala, sensibilidad climática, trazabilidad y uso operativo*). **ii)** Una aplicación empírica en la zona metropolitana de Guatemala con tres modelos seleccionados (*RENATA, Thornthwaite-Mather y Hargreaves*) elegidos por aplicabilidad urbana, parsimonia y disponibilidad de datos, además de su sensibilidad a temperatura y precipitación. La validez se garantiza por triangulación: coherencia interna entre modelos, consistencia con literatura internacional y análisis de sensibilidad. La recarga actual se ubica en ~20 – 28% de la precipitación anual; bajo +2 °C disminuye ~10–18%, con –20% de precipitación baja ~15–25% y el escenario combinado sugiere –35 a –45%. Los resultados son consistentes con el IPCC y estudios regionales, e implican gestión orientada a evidencia: protección por zonas de protección, condicionamiento de licencias al balance hídrico, recarga gestionada de acuíferos (**MAR**) e infraestructura verde urbana.

**Palabras clave:** Recarga hídrica, incertidumbre, cambio climático, epistemología.

## Introducción

La creciente escasez hídrica y la intensificación de fenómenos climáticos extremos han evidenciado las limitaciones de los métodos tradicionales para estimar la recarga de acuíferos. En un contexto global donde la demanda supera la capacidad de renovación natural de muchos sistemas subterráneos, la recarga hídrica se convierte en un parámetro crítico para la planificación territorial y la sostenibilidad (*Foster & Chilton, 2003; Gleeson et al., 2012*). Los escenarios de cambio climático caracterizados por alteraciones en los patrones de precipitación y aumento de temperaturas generan nuevas incertidumbres, tanto técnicas como epistemológicas, en las metodologías de estimación (*Taylor et al., 2013; de Vries & Simmers, 2002*).

La estimación de recarga implica procesos complejos que dependen de factores como infiltración, evapotranspiración y

características del acuífero. Sin embargo, existe un desequilibrio entre el desarrollo de métodos sofisticados y la capacidad técnica para aplicarlos en regiones en desarrollo (*Scanlon et al., 2002; MacDonald et al., 2012*). En zonas tropicales como Centroamérica, estas limitaciones se acentúan debido a la alta variabilidad climática y degradación de coberturas vegetales (*Simmers, 2002; Scanlon et al., 2006*).

Las metodologías tradicionales asumen sistemas lineales y condiciones estacionarias, cada vez menos representativas de la realidad (*Blöschl et al., 2013*). Ante esta complejidad, se requieren enfoques que reconozcan la incertidumbre inherente de los sistemas hidrológicos, adoptando perspectivas como la hidrogeología crítica (*Linton & Budds, 2014*). Tecnologías emergentes como la inteligencia artificial ofrecen nuevas posibilidades para complementar la modelación tradicional en contextos con datos escasos (*Kratzert et al., 2019*).

Este artículo propone un diseño dual que integra: (i) revisión comparativa de diez métodos mediante matriz multicriterio, y (ii) aplicación empírica de tres modelos seleccionados (RENATA, Thornthwaite-Mather, Hargreaves) en estudio de caso urbano con escenarios de cambio climático.

Esta aproximación busca reducir la incertidumbre mediante la triangulación metodológica y la integración de conocimientos científicos y locales para mejorar la gestión hídrica en contextos de vulnerabilidad.

# Método

**Diseño de la investigación:** Se adoptó un enfoque metodológico mixto, integrando técnicas cuantitativas y cualitativas para lograr una comprensión integral de las limitaciones metodológicas en la estimación de la recarga hídrica. El tipo de estudio fue exploratorio, descriptivo y analítico. Mientras que el paradigma de investigación fue el crítico-reflexivo, fundamentado en las epistemologías del Sur y la hidrogeología crítica (Linton & Budds, 2014), permitiendo integrar conocimientos científicos, técnicos y saberes ancestrales.

**Fase 1: Revisión sistemática de literatura:** Identificar las principales metodologías empleadas en la estimación de la recarga hídrica, sus fundamentos teóricos, aplicaciones y limitaciones. Para ello se hizo con el método de búsqueda de aplicación del protocolo PRISMA para revisiones sistemáticas en bases de datos como Scopus, Web of Science y Google Scholar. Para ello, se adoptaron los criterios de inclusión siguientes: Publicaciones entre 2000 y 2024, estudios relacionados con estimación de recarga hídrica en contextos de cambio climático, aplicaciones en regiones de América Latina y el Caribe.

**Fase 2: Análisis comparativo de métodos:** Se utilizó una matriz de análisis comparativo basada en criterios de: escalabilidad, requerimiento de datos, precisión y validación, costo y complejidad operativa y capacidad de adaptación a escenarios de cambio climático.

**Fase 3: Estimación simulada de recarga (estudio de caso: Guatemala):** Para ello se procedió a utilizar datos climatológicos simulados de la zona metropolitana de Guatemala, aplicación de los modelos RENATA, Thornthwaite-Mather y Hargreaves para la estimación de la recarga anual y análisis de la sensibilidad de los resultados frente a escenarios de incremento de temperatura (+2°C) y reducción de la precipitación (-20%).

**a) Criterios de selección de modelos (validez metodológica):** Se priorizaron modelos con validez metodológica y aplicabilidad en entornos urbanos con datos limitados. Los criterios incluyeron parsimonia, baja dependencia de parámetros complejos y sensibilidad diferenciada a precipitación y temperatura. También se consideró su uso y validación previa en la literatura regional. Bajo estas premisas, se seleccionaron los modelos RENATA, Thornthwaite-Mather y Hargreaves.

**b) Validez interna:** Coherencia y orden esperado de resultados (*Hargreaves* > *RENATA* > *Thornthwaite-Mather*), consistentes con la subestimación relativa de ETP en Hargreaves en climas tropicales y la mayor sensibilidad térmica de Thornthwaite-Mather. Se reportan bandas de sensibilidad por escenario y se triangulan con la revisión de literatura.

**Fase 4: Análisis de datos:** Para el enfoque cuantitativo se realizó análisis estadístico de la variabilidad de resultados obtenidos con los diferentes métodos, utilizando indicadores de tendencia central, dispersión y análisis de sensibilidad. Mientras que para el enfoque cualitativo se realizó análisis de contenido temático categorizando las principales recomendaciones y críticas.

**Marco conceptual de la incertidumbre:** La incertidumbre en la estimación de la recarga puede entenderse como la variabilidad no resuelta entre lo observado, lo modelado y lo real. Esta puede clasificarse en tres categorías principales:

- a)** Incertidumbre epistémica, derivada de la falta de conocimiento o comprensión de los procesos;
- b)** Incertidumbre aleatoria, originada en la variabilidad natural del sistema; y
- c)** Incertidumbre estructural, vinculada a las limitaciones de los modelos utilizados (*Beven, 2006; Montanari, 2007*).

En ausencia de series largas y mediciones directas, la validez se garantiza por triangulación: **i)** Coherencia interna entre modelos (*orden esperado por sensibilidad a ETP*), **ii)** Consistencia con rangos reportados en literatura internacional, y **iii)** análisis de sensibilidad (+2 °C, -20 % P) que reproduce respuestas físicas plausibles. Esta combinación constituye evidencia suficiente para uso operativo y para orientar gestión urbana (*Recarga gestionada de acuíferos, conservación de permeabilidad, perímetros de protección*).

# Resultados

La matriz multicriterio (*Tabla 1*) evidencia que ningún método es universal; la precisión, costo y escalas varían (*Healy & Cook, 2002; Scanlon et al., 2002*).

Tabla 1  
Matriz de análisis comparativo

Método	Escalabilidad	Requerimiento de datos	Precisión y validación	Costo y complejidad operativa	Adaptación a escenarios de cambio climático
Balace hídrico global	Alta (regiones grandes)	Baja	Baja	Bajo	Baja (no considera escenarios futuros)
Balace hídrico en el suelo	Media	Media (datos de humedad)	Media-Alta	Media	Media (limitado a condiciones actuales)
Razón de escorrentía	Alta	Muy bajo	Baja	Muy bajo	Baja (no contempla cambios en uso del suelo)
Método del Cloruro	Baja (zonas áridas)	Medio (análisis químico)	Alta en zonas áridas	Medio-Alto	Baja (no considera dinámicas de cambio climático)
Water Table Fluctuation	Baja (acuíferos locales)	Alto (monitoreo piezométrico)	Alta	Alto (requiere instrumentación constante)	Media (con buena red de monitoreo)
Trazadores naturales (helio)	Baja	Alto (laboratorio especializado)	Muy alta	Muy alto	Alta (permite estimar recarga histórica)
Modelación matemática (SWAT, MODFLOW)	Alta	Muy alta (bases de datos completas)	Muy alta (validable)	Muy alto	Alta (permite escenarios de proyección)
Lysímetros	Muy baja (sitios puntuales)	Alto	Muy alta (directa)	Muy alto	Baja (poco aplicable a escala de paisaje)
Baseflow separation	Media	Medio (datos hidrométricos)	Media	Bajo	Media (depende de calidad de series históricas)
Sensoramiento TDR / humedad del suelo	Media	Alto (instalación de sensores)	Alta	Alto	Media (aporta datos en tiempo real, pero limitado en proyección futura)

Los resultados del análisis comparativo evidencian que no existe un método universalmente aplicable para la estimación de la recarga. Cada técnica está condicionada por la disponibilidad de datos, la escala temporal y espacial, presupuesto, complejidad hidrogeológica y la capacidad técnica de los operadores (Healy & Cook, 2002).

**Análisis crítico de la matriz:** Los métodos empíricos y de balance hídrico son los más utilizados en Guatemala, valorados por su bajo costo y facilidad de aplicación, a pesar de sus limitaciones en precisión y manejo de incertidumbres; por el contrario, métodos avanzados como la modelación matemática y el uso de trazadores son escasamente aplicados debido a restricciones económicas e institucionales, situación que se ve agravada por la limitada infraestructura para mediciones directas como lisímetros y sensores TDR, lo cual restringe la obtención de datos de campo de alta calidad.

**Implicaciones para la gestión del agua subterránea:** El uso exclusivo de métodos de bajo costo puede llevar a subestimaciones o sobreestimaciones significativas de la recarga, afectando la gestión de acuíferos en un contexto de creciente demanda hídrica y cambio climático. Es urgente promover la triangulación metodológica, integrando herramientas cuantitativas con el conocimiento tradicional local para lograr estimaciones más robustas y adaptadas a las realidades socioambientales de cada territorio.

**Procedimiento y modelos aplicados en estudio de caso:**

Se utilizaron registros climatológicos simulados de la zona metropolitana de Guatemala, correspondientes a un período base de 30 años (1990-2020). Los parámetros de entrada incluyeron precipitación media anual de 1200 mm y temperatura media anual de 22°C.

Los modelos aplicados fueron: **RENATA** (Modelo de balance hídrico aplicado a recarga natural), **Thornthwaite-Mather** (1955), utilizando la metodología clásica de balance de humedad en el suelo y **Hargreaves** (1985), con enfoque en estimaciones de evapotranspiración potencial (ETP) con base en temperatura.

**Resultados de recarga anual en el escenario base (condiciones actuales)**

Modelo	Recarga anual estimada (mm)	% de precipitación
RENATA	310	25.8%
Thornthwaite-Mather	260	21.7%
Hargreaves	340	28.3%

El modelo **Hargreaves** estima la recarga más alta debido a su tendencia a subestimar la evapotranspiración en climas tropicales. El modelo **Thornthwaite-Mather** es más conservador, en parte por su alta sensibilidad a la temperatura y la capacidad de retención de humedad en el suelo y **RENATA** ofrece resultados intermedios y se considera más adecuado para áreas urbanas con suelos parcialmente impermeabilizados.

**Aplicación empírica (3 modelos) y escenarios:** En el estudio de caso urbano, los tres modelos sitúan la recarga actual entre 20–28 % de P, y bajo +2 °C o -20% P disminuye 13–25%; el escenario combinado sugiere -35 a -45%.

**Escenario 1. Incremento de la temperatura en +2 °C**

Modelo	Recarga (mm)	% Cambio respecto al escenario base
RENATA	260	-16.1%
Thornthwaite-Mather	210	-19.2%
Hargreaves	295	-13.2%

El aumento de temperatura reduce la recarga debido a un incremento de la ETP. Thornthwaite-Mather muestra la mayor sensibilidad por su alta dependencia de la temperatura en el cálculo de la ETP.

**Escenario 2. Reducción de precipitación en -20%**

Modelo	Recarga (mm)	% Cambio respecto al escenario base
RENATA	240	-22.6%
Thornthwaite-Mather	195	-25.0%
Hargreaves	270	-20.6%

La reducción en la precipitación tiene un impacto directo en la recarga hídrica, tal como lo evidencian los tres modelos aplicados en la zona metropolitana de Guatemala, los cuales coinciden en que la recarga actual equivale al 20% - 28% de la precipitación anual. Entre ellos, el modelo RENATA destaca por su capacidad para representar este fenómeno con mayor precisión, ya que incorpora umbrales de saturación del suelo y considera el comportamiento hidrológico en entornos urbanos.

Los resultados muestran que la recarga es más sensible a la disminución de la precipitación que al aumento de la temperatura, aunque la combinación de ambos factores genera un efecto acumulativo crítico. Bajo un escenario de +2°C y -20% de precipitación, la recarga proyectada disminuiría entre 35% y 45%, lo que amenazaría la sostenibilidad de los acuíferos. Por su adecuación a contextos urbanos, se recomienda el uso de RENATA, que integra el efecto de la cobertura impermeable, a diferencia de Thornthwaite-Mather y Hargreaves, diseñados para ambientes naturales o agrícolas.

La caída proyectada de la recarga (-35 a -45 %) es consistente con evidencias para climas tropicales bajo aumento de ETP y cambios en P (Taylor et al., 2013) y con el IPCC AR6 sobre intensificación del ciclo hidrológico y mayor demanda evaporativa (IPCC, 2021).

Tabla 2  
Comparación entre modelos físicos tradicionales e inteligencia artificial en hidrología

Enfoque	Ventaja	Limitaciones
Modelos físicos (SWAT, MODFLOW)	Proyección explícita, control de variables internas	Alta demanda de datos, costosos, lentos
IA (ANN, NRM, SVM)	Aprende patrones ocultos, útil con pocos datos	"Caja negra", requiere validación externa

**Análisis de la incertidumbre:** Los métodos basados en modelos numéricos, si bien sofisticados, dependen de series históricas de datos que no siempre están disponibles, especialmente en regiones en desarrollo (IPCC, 2021). Por su parte, los métodos isotópicos proporcionan mayor precisión, pero sus costos los hacen inviables para aplicaciones a gran escala. El método RENATA, ampliamente utilizado en América Latina, integra variables de precipitación, temperatura, uso del suelo y características edáficas, pero enfrenta limitaciones derivadas de su dependencia de estaciones meteorológicas escasas y la falta de validación en condiciones de cambio climático (Ochoa, et al, 2022).

**Retos epistemológicos:** El mayor reto no es únicamente técnico, sino epistemológico: las metodologías tradicionales asumen sistemas lineales y condiciones estacionarias, las cuales son cada vez menos representativas de la realidad (Blöschl et al., 2013). Se requiere un enfoque que reconozca la complejidad e incertidumbre inherentes a los sistemas hidrológicos, adoptando la perspectiva de la "Hidrogeología crítica" (Linton & Budds, 2014 y FAO, 1998.).

**Limitaciones en la implementación de modelos en países en vías desarrollo:** La aplicación de modelos de recarga hídrica en regiones en desarrollo enfrenta limitaciones estructurales y técnicas críticas. La escasez de datos hidrometeorológicos confiables en cuencas no instrumentadas obstaculiza la calibración y validación de modelos avanzados (Taylor et al., 2013; Scanlon et al., 2002). La discontinuidad de las redes de monitoreo y la falta de series temporales completas reducen la aplicabilidad real de herramientas como SWAT o MODFLOW en estos contextos (Gleeson et al., 2012; MacDonald et al., 2012).

Las limitaciones tecnológicas e institucionales profundizan estos desafíos. La infraestructura insuficiente impide implementar modelos que requieren estaciones automáticas y sensores remotos (Mileham et al., 2008; De Vries & Simmers, 2002). Aún con software disponible, las capacidades técnicas del personal local son limitadas por falta de formación continua y alta rotación institucional (Lerner et al., 1990), agravado por la desarticulación entre instituciones y actores comunitarios (Custodio & Llamas, 2016).

La transferencia indiscriminada de modelos del Norte Global genera problemas de adecuación contextual en regiones tropicales y andinas. Estos modelos no siempre se ajustan a condiciones edafológicas y climáticas locales, produciendo errores de escala y desconfianza en la planificación (Gleeson et al., 2012). Su validez depende de la sensibilidad a variables locales y compatibilidad con conocimientos tradicionales (Krueger et al., 2016).

**Epistemologías integradoras y diálogo de saberes:** Frente a las limitaciones de los modelos convencionales, se propone integrar el conocimiento local y comunitario en los procesos de estimación de recarga hídrica. Las comunidades rurales e indígenas poseen una memoria ecológica invaluable sobre la dinámica del agua en sus territorios, reconociendo cambios en

manantiales, flujos base y comportamiento del suelo. Esta sabiduría ancestral puede sistematizarse como insumo cualitativo para validar modelos y reducir la incertidumbre en contextos de datos limitados, representando un avance hacia enfoques más inclusivos.

Como estrategias concretas, el monitoreo participativo y el mapeo social permiten registrar variables hidrológicas e identificar zonas de recarga tradicionales. Complementariamente, los modelos híbridos interculturales combinan técnicas convencionales con indicadores locales como escurrimientos post-lluvia y cambios fenológicos. La inclusión de procesos deliberativos donde los resultados se debaten con las comunidades fortalece la legitimidad de los modelos y promueve una gobernanza hídrica más inclusiva y sostenible.

**Potencial de la inteligencia artificial en la reducción de la incertidumbre:** En la última década, la inteligencia artificial (IA) se ha consolidado como una herramienta disruptiva para abordar la incertidumbre en sistemas hídricos complejos. Modelos como redes neuronales artificiales (ANN), Neural Runoff Model (NRM), bosques aleatorios (RF) y máquinas de soporte vectorial (SVM) han demostrado notable capacidad para predecir variables como la recarga hídrica en contextos con datos incompletos, series temporales ruidosas o comportamientos no lineales (Xiang & Demir, 2020; Kratzert et al., 2019). Esta capacidad de aprendizaje automático identifica patrones ocultos en la interacción entre variables climáticas y físico-territoriales, representando una ventaja significativa donde los modelos físicos convencionales enfrentan limitaciones por escasez de datos o variabilidad climática intensificada.

La IA complementa el conocimiento hidrogeológico mediante modelos híbridos que combinan simulaciones físicas y aprendizaje automático, siendo particularmente útil en escenarios de cambio climático sin precedentes históricos. La incorporación progresiva de IA en estudios de recarga representa una línea estratégica para mejorar la planificación y toma de decisiones basada en evidencia contextualizada. Los rangos de 20-28% de precipitación para recarga urbana coinciden con lo reportado en contextos de impermeabilización y suelos de baja capacidad de almacenamiento (Healy & Cook, 2002; Scanlon et al., 2006), reforzando la necesidad de estrategias de recarga gestionada y conservación de áreas permeables.

## Conclusiones

Este trabajo integró una revisión comparativa (10 métodos) y una aplicación empírica (3 modelos); ambos convergen en que la recarga urbana actual (~20-28 % P) es altamente sensible a +2 °C/-20 % P (-35 a -45 %).

Se requiere fortalecer las capacidades institucionales y técnicas para mejorar la recolección de datos y la validación de modelos, así como la integración de

híbridas y enfoques de gobernanza adaptativa, claves para reducir la incertidumbre.

Incorporar el conocimiento local y las prácticas ancestrales en la gestión de recursos hídricos, complementando los métodos científicos. Asimismo, se recomienda explorar el uso de herramientas de inteligencia artificial para mejorar la estimación de la recarga en condiciones de baja instrumentación y variabilidad climática.

# Referencias Bibliográficas

- Beven, K. (2006).** A manifesto for the equifinality thesis. *Journal of Hydrology*, 320 (1–2), 18–36. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.07.007>
- Blöschl, G., et al. (2013).** Runoff prediction in ungauged basins: Synthesis across processes, places and scales. Cambridge University Press.
- Custodio, E., & Llamas, M. R. (2016).** Hidrogeología. Instituto Geológico y Minero de España (IGME). ISBN: 9788478408293.
- de Vries, J. J., & Simmers, I. (2002).** Groundwater recharge: An overview of processes and challenges. *Hydrogeology Journal*, 10(1), 5–17. <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0171-7>
- FAO. (1998).** Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56.
- Foster, S., & Chilton, J. (2003).** Groundwater: The processes and global significance of aquifer degradation. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 358(1440), 1957–1972. <https://doi.org/10.1098/rstb.2003.1380>
- Gleeson, T., Wada, Y., Bierkens, M. F., & van Beek, L. P. (2012).** Water balance of global aquifers revealed by groundwater footprint. *Nature*, 488(7410), 197–200. <https://doi.org/10.1038/nature11295>
- Healy, R. W., & Cook, P. G. (2002).** Using groundwater levels to estimate recharge. *Hydrogeology Journal*, 10(1), 91–109.
- IPCC. (2021).** Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report. Cambridge University Press.
- Kratzert, F., Klotz, D., Shalev, G., Klambauer, G., Hochreiter, S., & Nearing, G. (2019).** Towards learning universal, regional, and local hydrological behaviors via machine learning applied to large-sample datasets. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(12), 5089–5110. <https://doi.org/10.5194/hess-23-5089-2019>
- Lerner, D. N., Issar, A. S., & Simmers, I. (1990).** Groundwater recharge: A guide to understanding and estimating natural recharge. *International Contributions to Hydrogeology*, 8.
- Linton, J., & Budds, J. (2014).** The hydrosocial cycle: Defining and mobilizing a relational-dialectical approach to water. *Geoforum*, 57, 170–180.
- Krueger, T., Maynard, C., Carr, G., Bruns, A., Mueller, E. N., & Lane, S. N. (2016).** A transdisciplinary account of water research. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 3(3), 369–389. <https://doi.org/10.1002/wat2.1132>
- MacDonald, A. M., Bonsor, H. C., Dochartaigh, B. É. Ó., & Taylor, R. G. (2012).** Quantitative maps of groundwater resources in Africa. *Environmental Research Letters*, 7(2), 024009. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/2/024009>
- Mileham, L., Taylor, R. G., Todd, M. C., Thompson, J. R., & Tindimugaya, C. (2008).** The impact of climate change on groundwater recharge and runoff in a humid, equatorial catchment: Sensitivity of projections to rainfall intensity. *Hydrological Sciences Journal*, 53(4), 706–720. <https://doi.org/10.1623/hysj.53.4.706>
- Montanari, A. (2007).** What do we mean by “uncertainty”? The need for a consistent wording about uncertainty assessment in hydrology. *Hydrological Processes*, 21(6), 841–845. <https://doi.org/10.1002/hyp.6623>
- Ochoa-Orozco, W., Rivera, P., & Herrera, E. (2022).** Comportamiento meteorológico durante la sequía de medio verano en Guatemala. *Ciencia, Tecnología y Salud*, 9(2), 150–165. <https://doi.org/10.36829/63CTS.v9i2.1284>
- Scanlon, B. R., Healy, R. W., & Cook, P. G. (2002).** Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal*, 10(1), 18–39. <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0176-2>
- Scanlon, B. R., Keese, K. E., Flint, A. L., Flint, L. E., & Gaye, C. B. (2006).** Global synthesis of groundwater recharge in semiarid and arid regions. *Hydrological Processes*, 20(15), 3335–3370. <https://doi.org/10.1002/hyp.6335>
- Simmers, I. (Ed.). (2002).** Recharge of phreatic aquifers in (semi-)arid areas. A.A. Balkema Publishers. ISBN: 9789054106791
- Taylor, R. G., et al. (2013).** Ground water and climate change. *Nature Climate Change*, 3, 322–329. <https://doi.org/10.1038/nclimate1744>
- Xiang, Z., & Demir, I. (2020).** Distributed long-term hourly streamflow predictions using deep learning: A case study for State of Iowa. *Environmental Modelling & Software*, 131, 104761. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104761>



# REGIONALIZACIÓN climática del valle de **QUETZALTENANGO** y para el **cultivo** de frutales **caducifolios**

**Autores:** Héctor Alvarado Quiroa, Hugo García Hernández, Víctor José Alvarado Soto

## Sobre los autores:

**Héctor Alvarado Quiroa:** Doctor en Ciencias Naturales con énfasis en Gestión Ambiental (Programa DOCINADE, Costa Rica 2017), Maestro en Ciencias en Administración de Tierras para el Desarrollo Sostenible (Facultad de Agronomía USAC, 2010), Maestro en Ciencias en Gerencia de la Agricultura Sostenible y de los Recursos Naturales (Universidad Rafael Landívar, 2002), Ingeniero Agrónomo (Centro Universitario de Occidente USAC, 1990), Profesor de la División de Ciencia y Tecnología, | Centro Universitario de Occidente, Universidad de San Carlos de Guatemala.

**Hugo García Hernández:** Investigador adjunto. Ingeniero Agrónomo en Sistemas de Producción Agrícola (Centro Universitario de Occidente USAC, 2000), Master en Ciencias de la Geoinformación y Observación de la Tierra, con énfasis en Recursos Hídricos (Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia 2014). Profesor de la División de Ciencia y Tecnología, Centro Universitario de Occidente, Universidad de San Carlos de Guatemala.

**Víctor José Alvarado Soto:** Investigador Auxiliar. Técnico Universitario en Agrimensura (Centro Universitario de Occidente USAC, 2006), Ingeniero en Administración de Tierras de la División (Centro Universitario de Occidente USAC, 2019), Maestría en Gestión Ambiental y Sostenibilidad (Universidad del Valle, Guatemala, 2023)

## Resumen

El establecimiento comercial de frutales deciduos en Guatemala enfrenta limitaciones impuestas por sus requerimientos eco fisiológicos de latencia invernal, lo que justifica la necesidad de una zonificación agroclimática precisa. Este estudio se centró en los valles interandinos de Quetzaltenango y Totonicapán para demarcar zonas homogéneas de potencial productivo mediante un análisis multicriterio.

La metodología empleó cinco variables críticas de aptitud: acumulación de horas frío (*HF*), riesgo de heladas, déficit hídrico (*DH*), pisos altitudinales y pendiente topográfica. Se utilizaron datos de 12 estaciones meteorológicas, que fueron espacialmente interpolados; el algoritmo con el mínimo Error Medio Cuadrático (*RMSE*) fue seleccionado para generar las capas climáticas. Las variables topográficas se derivaron de un Modelo Digital de Elevación (*MDE*). Posteriormente, todas las capas ráster fueron reclasificadas en cuatro niveles de aptitud utilizando el método de optimización de Jenks Natural Breaks.

El análisis reveló que el 90% de la producción actual se concentra en áreas que acumulan entre 401 y 550 Horas Frío, estableciendo un rango óptimo de referencia local. En contraste, se identificó que el 46% del área total está expuesta a heladas severas con registros de temperatura mínima de  $-11.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ , lo cual representa un riesgo crítico para la viabilidad de la antesis y el cuajado de fruto. Además, el estudio localizó las zonas con mayor estrés hídrico con valores inferiores a  $1\text{mm/día}$  en las planicies del sur de Totonicapán, particularmente vulnerables durante la canícula.

La integración geoespacial ponderada de las variables culminó en la delimitación de cuatro macro-regiones climáticas con potencial diferenciado. Estos resultados ofrecen una base técnica y cartográfica sólida para la planificación territorial, permitiendo la implementación de estrategias de mitigación y la selección de cultivares con requerimientos de frío adaptados a las condiciones específicas del Altiplano.

**Palabras clave:** Zonificación Agroclimática, Frutales Deciduos, Horas Frío, Riesgo de Heladas, Análisis Multi-Criterio, Sistemas de Información Geográfica (SIG).

# Introducción

La fruticultura caducifolia de clima templado emerge como una actividad agrícola de alto potencial para la diversificación productiva en las zonas montañosas de Guatemala. Específicamente, el valle de Quetzaltenango y su entorno ofrecen condiciones agroclimáticas aptas para especies como el melocotón (*Prunus persica*), el manzano (*Malus domestica*), el ciruelo (*Prunus domestica*) y el peral (*Pyrus communis*). El éxito productivo y la competitividad de estos cultivos exigen un conocimiento exhaustivo de los factores limitantes térmicos, hídricos y fisiográficos que modulan su fenología y rendimiento (Calderón Alcaraz, 1993; Westwood, 2009). La regionalización climática, facilitada por los Sistemas de Información Geográfica (SIG), es la herramienta metodológica idónea para delimitar áreas homogéneas y optimizar la planificación agrícola (FAO, 2012).

## Antecedentes

El desarrollo de la fruticultura caducifolia en Guatemala se consolidó con programas de diversificación productiva en las décadas de 1980 y 1990 (MAGA, PROFRUTA), enfocados en la introducción de frutales de alto valor en regiones templadas (Alvarado Quiroa, 1999). Estudios previos confirman que el rendimiento depende directamente de la satisfacción del requerimiento de frío invernal, esencial para la ruptura uniforme de la dormancia. Un déficit de Horas Frío (HF) resulta en floración irregular, mientras que las heladas excesivas causan daños críticos a los tejidos florales y fructíferos (Westwood, 2009; Calderón Alcaraz, 1993). El Altiplano Occidental se clasifica climáticamente como una zona intermedia templada (12 °C a 18 °C de media anual), con una marcada variabilidad espacial y altitudinal (2,000 a 3,000 m.s.n.m.) que requiere la aplicación de métodos de interpolación geoespacial para una delimitación precisa de los microclimas (INSIVUMEH, 2020; García Hernández, 2019).

## Planteamiento del problema

El desarrollo actual del cultivo de frutales caducifolios en el valle de Quetzaltenango se ha llevado a cabo de manera empírica, sin una delimitación agroclimática espacialmente explícita. Esta carencia ha provocado desadaptación de cultivares, fluctuaciones significativas en la productividad y pérdidas económicas recurrentes debido a eventos extremos como heladas y déficits hídricos estacionales. La falta de cartografía climática detallada restringe la toma de decisiones técnicas en cuanto a la selección varietal, la planificación del riego y las prácticas de manejo. El desconocimiento de los requerimientos térmicos específicos en las distintas altitudes compromete la sincronización fenológica (floración y cuajado). Ante la intensificación del cambio climático y la variabilidad interanual, la ausencia de una regionalización climática precisa

se erige como el principal obstáculo para la gestión racional y sostenible de la producción frutícola en la zona.

## Justificación

La regionalización climática ofrece la base científica indispensable para garantizar la sostenibilidad de la fruticultura de montaña al asegurar el cumplimiento de los requerimientos fisiológicos del cultivo. El valle de Quetzaltenango, dada su heterogeneidad ambiental influenciada por la topografía y la altitud, presenta una oportunidad para establecer una matriz de variedades con distinto requerimiento de frío. Este estudio se justifica al generar información científica y cartográfica actualizada que permite: **a) Planificación Racional:** Orientar la producción en función del comportamiento térmico e hídrico del territorio. **b) Mitigación de Riesgos:** Identificar zonas propensas a heladas y sequías para implementar medidas correctivas. **c) Gestión Territorial:** Servir como una base técnica para la formulación de políticas agrícolas, el ordenamiento productivo y la transferencia de tecnología adaptada.

## Objetivo

Realizar la regionalización climática del valle de Quetzaltenango para identificar zonas homogéneas de aptitud para el cultivo de frutales caducifolios, mediante la integración de variables clave de clima y fisiografía.

## Hipótesis

La variabilidad microclimática del valle de Quetzaltenango, determinada por la interacción de la altitud y la topografía, genera un patrón espacial discernible de Horas Frío y riesgo de heladas, permitiendo la delimitación de regiones agroclimáticas homogéneas aptas para la planificación productiva de frutales deciduos mediante técnicas de interpolación geoespacial.

## Método

**Área de estudio:** La investigación se desarrolló en el valle de Quetzaltenango y su entorno inmediato, comprendiendo los municipios de Quetzaltenango, La Esperanza, Salcajá, San Cristóbal Totonicapán, San Francisco El Alto y parte sur de Totonicapán. Esta zona se localiza entre las coordenadas 14°45' y 14°58' de latitud norte, y 91°25' y 91°35' de longitud oeste.

**Fuentes de información:** Se utilizaron datos meteorológicos de 12 estaciones ubicadas en el área de estudio, pertenecientes al Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH), a la Asociación Nacional del Café (ANACAFÉ), al Centro Universitario de Occidente (CUNOC-USAC) y al proyecto

PROFRUTA. El período analizado abarcó de noviembre de 2012 a febrero de 2019.

### Variables analizadas:

**a) Horas frío (HF):** La variable Horas Frío (HF) mide la acumulación térmica invernal, que es fisiológicamente esencial para la ruptura de la dormancia endógena en las yemas de frutales caducifolios, condicionando la uniformidad de la brotación y el rendimiento (Calderón Alcaraz, 1993). Operacionalmente, se define como la suma de horas en que la temperatura ambiente fue inferior a  $-7-0$  °C. Para su cálculo, se procesaron registros históricos horarios de temperatura de un conjunto de estaciones durante el período frío (octubre a marzo). La media aritmética multianual de HF para cada estación se calculó mediante tabulación en hojas de cálculo para obtener un valor representativo.

Modelado Geoespacial y Validación: los valores medios de HF se integraron en un archivo vectorial de puntos (shapefile), georreferenciado bajo el sistema Guatemala Transverse Mercator (GTM). Para generar una capa ráster continua de la distribución espacial, se evaluaron seis algoritmos de interpolación mediante el software ILWIS 3.3 (Nearest Point, Moving Average Inverse Distance, etc.). La selección del modelo óptimo se basó en una validación cruzada, donde se calculó el Error Cuadrático Medio (ECM) al comparar los valores interpolados con los observados en las estaciones. El método Moving Average Inverse Distance fue seleccionado al registrar la menor tasa de error ( $ECM = 0.05$ ). Finalmente, la capa ráster de HF fue clasificada en clases de aptitud mediante el método de quiebres naturales (Jenks), lo que garantiza una homogeneidad intra-clase máxima, fundamental para la zonificación agroclimática.

Tabla 1  
Clasificación de horas frío en el valle de Quetzaltenango

Clase	Rango (horas frío)	Descripción
1	> 550	Muy alto potencial térmico
2	401-550	Alto potencial térmico
3	301-400	Medio potencial térmico
4	< 301	Bajo potencial térmico

Fuente: Elaboración propia con base en datos de INSIVUMEH, ANACAFÉ, CUNOC-USAC y PROFRUTA (2012-2019).

**b) Riesgo de heladas (RH):** El Riesgo a Heladas se define como el período dentro del ciclo anual con probabilidad de ocurrencia de un evento agrometeorológico que cause daño económico a los órganos vegetativos y reproductivos del cultivo (Alvarado Q., 2001). La cuantificación operacional se basó en el análisis de los registros históricos horarios de temperatura de las estaciones meteorológicas. Utilizando hojas de cálculo de Excel, se identificaron y sumaron las horas de temperatura crítica que cumplen con los parámetros de daño fisiológico definidos para el estado fenológico sensible. La media multianual de estas horas críticas se calculó para cada estación y se integró como un nuevo campo de dominio (double) en el shapefile de puntos previamente creado para las Horas Frío.

Modelado Geoespacial y Validación: para la localización espacial de la variable riesgo a heladas, se empleó el mismo

procedimiento de interpolación geoespacial utilizado para las horas frío, evaluando los seis métodos disponibles en el software ILWIS 3.3. La validación cruzada se ejecutó mediante el cálculo del Error Cuadrático Medio para determinar la bondad de ajuste de cada modelo. La evaluación consistió en extraer el valor interpolado (Ilwis mapvalue) en las coordenadas (X, Y) de cada estación y compararlo con el dato real observado. El análisis determinó que el método Moving Average Inverse Distance presentó el menor ECM ( $ECM = 0.07$ ), siendo el seleccionado para generar la capa ráster final que representa la distribución espacial del Riesgo a Heladas en el área de estudio.

Tabla 2  
Clasificación de áreas para la variable riesgo a heladas

Clase	Rango (horas frío)	Descripción
1	> -1 °C	Ningún daño en la fase fenológica de flor
2	-1.1 °C a -3.0 °C	Daño medio (muerte del 10% de la fase fenológica de flor y 20% fruto recién cuajado)
3	-3.1 °C a -6 °C	Daño alto (muerte del 90% de la fase fenológica de flor y fruto recién cuajado)
4	< a -6 °C	Daño extremadamente alto (muerte del 100% de la fase fenológica de flor y fruto recién cuajado)

Fuente: Alvarado Quiroa, (1999)

**c) Déficit hídrico (DH):** El Déficit Hídrico (DH) se conceptualiza como la escasez de agua para el cultivo cuando la precipitación efectiva es inferior a la evapotranspiración real (Castro Loarca, 1996).

La cuantificación operacional se realizó en hojas de cálculo mediante el balance hídrico, calculando la ETR y la acumulación diaria y anual de la PP para cada estación. La ETR fue calculada por medio de la relación entre la Evapotranspiración Potencial (ET) y el coeficiente del cultivo (Kc):  $ETR = ETP * Kc$ , donde ETR (evapotranspiración real), Kc (coeficiente de cultivo).

La evapotranspiración potencial (ET) se estimó mediante el **método de Hargreaves** (Hargreaves & Allen, 2003), para lo cual se utilizó la siguiente fórmula, tras calcular la temperatura media diaria (tmed) a partir de los registros horarios:  $ETO = 0.0135(tmed + 17.78) Rs$  donde ETO = Evapotranspiración potencial diaria en mm/día, tmed = Temperatura media en °C, Rs = Radiación solar incidente convertida en mm/día. Para el cálculo del factor de Rs se estimó utilizando las ecuaciones de Allen et al. (1998) mediante **interpolación de valores de latitud** 14° y 16° Norte para compensar la posición geográfica de Guatemala 15° Norte. El coeficiente de cultivo (Kc) se determinó mensualmente para frutales deciduos con base en la referencia de la **FAO** (Steduto, et al., 2012), lo que permitió obtener la (ETR) diaria acumulada durante el período de estudio.

**Procesamiento Geoespacial:** Los valores de (DH) acumulado se integraron en el entorno SIG, sometiéndose al mismo protocolo de **interpolación espacial y validación (ECM)** aplicado a las variables térmicas (Horas Frío y Riesgo a Heladas). La capa ráster de (DH) resultante fue posteriormente clasificada para identificar las zonas con alto **estrés hídrico** ( $DH < 1$  mm/día), particularmente vulnerables durante la canícula.

Tabla 3  
Clasificación de áreas para la variable déficit hídrico

Clase	Valor pp - ETR	Descripción
1	> a 1600 mm/año	Sin estrés hídrico
2	801 a 1600 mm/año	Bajo estrés hídrico
3	2 a 800 mm/año	Medio estrés hídrico
4	< a 1 mm/año	Alto estrés hídrico

Fuente: Elaboración propia con base en datos de INSIVUMEH, ANACAFÉ, CUNOC-USAC y PROFRUTA (2012-2019).

**d) Altitud (A):** Definición y Generación del Modelo: la altitud es la distancia vertical de un punto en la superficie terrestre respecto al nivel medio del mar. En el contexto agroclimático, esta variable fisiográfica es crítica, funcionando como un factor indirecto (*proxy*) que controla la temperatura del aire debido a su correlación inversa con el gradiente térmico vertical.

Definición Operacional y Clasificación: la capa ráster de altitud se generó a partir de un Modelo Digital de Elevación (MDE) preexistente de Guatemala. El MDE fue recortado al área de estudio mediante la aplicación del comando ifnotundef en el entorno SIG para delimitar los rangos de elevación. Para la zonificación, el rango altitudinal se segmentó en regiones de influencia. La reclasificación del MDE en clases de aptitud se realizó utilizando el método de quiebres naturales (*Jenks*). Este método estadístico optimiza la homogeneidad interna de cada clase y maximiza las diferencias entre clases adyacentes, estableciendo rangos que reflejan las variaciones microclimáticas asociadas, lo cual es esencial para la posterior evaluación multi-criterio. Los pisos altitudinales se clasificaron en >2700 msnm, de 2401 a 2700 msnm, de 2101 a 2400 msnm y de 1800 a 2100 msnm

# Resultados

**Áreas con similar acumulación de horas frío:** El análisis de la acumulación de Horas Frío (HF) se realizó mediante el método de Da Mota, determinando la disponibilidad térmica invernal en el área de estudio. Los datos estadísticos revelaron una alta heterogeneidad espacial en la acumulación de frío, evidenciada por una desviación estándar ( $\sigma$ ) de 71.2 HF. El rango total de acumulación varió significativamente, desde un mínimo de 457 HF hasta un máximo de 703 HF, con un promedio regional de 580.3 HF.

El análisis espacial de la acumulación de Horas Frío (HF) reveló una disparidad significativa entre la disponibilidad térmica y los requerimientos varietales actuales.

Se identificó que el 90% de la producción actual de frutales deciduos se localiza en la Región de Aptitud Media (*color verde*), caracterizada por un rango de acumulación de 401 a 550 HF. Esta región abarca 27,804 ha, lo que representa el 21.4% del área de estudio. Déficit Crítico: El 80% de las plantaciones de melocotón en esta zona corresponden a la variedad Salcajá, cuyo requerimiento fisiológico es de 800 HF. La diferencia entre la acumulación disponible y la requerida indica un déficit de horas frío sustancial que impacta negativamente la calidad, el rendimiento y la vida útil de las plantaciones.

Las otras regiones se distribuyen de la siguiente manera: Región de Alta Acumulación (*Azul*): Acumulación mayor a 550 HF, cubriendo 54,931 ha (42.2%). Región de Baja Acumulación (*Amarillo*): Acumulación entre 301 a 400 HF, ocupando 22,158 (19.3%). Esta zona es idónea para la introducción de cultivares de bajo requerimiento de frío. La cartografía resultante proporciona una orientación técnica directa para la planificación de nuevas plantaciones y la selección de cultivares basándose en la adaptación precisa a la acumulación de HF de cada microrregión (**ver figura 1**).

**Riesgo de heladas:** Al observar los datos estadísticos del comportamiento de las temperaturas que producen heladas agrometeorológicas en el área de estudio, se puede apreciar que existe poca variabilidad entre las regiones establecidas. Se determinaron temperaturas críticas entre los -3.0 °C y los -11.8 °C, es decir que el área tiende a presentar temperaturas extremas de forma uniforme en el área de investigación. De acuerdo con Westwood (2009), las etapas fenológicas de los frutales deciduos, con mayor susceptibilidad al daño por heladas, ocurren en los estados de pétalos visibles y cuajado de fruta, siendo ésta última la etapa más susceptible. Un ejemplo de este caso es el cerezo, que es uno de los cultivos con mayor susceptibilidad, ya que a temperaturas de -2.1 °C con exposición por una hora o más, provoca la muerte del 10% de la fruta recién cuajada (TC10). Para el caso del melocotón la temperatura crítica ocurre en el cuajado de fruta y es de -2.5 °C.

El análisis geoespacial del riesgo térmico reveló que el 46.5% del área de estudio (60,555 ha (región Roja) está expuesto a temperaturas críticas severas, con registros que oscilan entre 6.1 °C hasta los -11.8 °C. Estas condiciones superan significativamente la Temperatura Crítica TC90 (donde los estados fenológicos sensibles (ej., pétalos visibles en melocotón, (TC90 = -9.2 °C) indicando un riesgo de pérdida total de la cosecha. La producción de frutales se concentra principalmente en dos zonas: Zona de Riesgo Alto (*Amarilla*): Coincidente con la ribera del río Samalá (5,821 ha, (4.5%), con temperaturas críticas de -3.1 °C a -6.0 °C. Zona de Riesgo Bajo (*Verde*): Menos afectada (21,094 ha (16.2%), con temperaturas de -1.1 °C a -3.0 °C.

Las temperaturas críticas demuestran la alta vulnerabilidad de las especies; la TC10 (temperatura de supervivencia del 10%) para flor abierta es de -2.7 °C en melocotón y -2.5 °C en ciruela, resaltando la necesidad de implementar estrategias de mitigación en la mayoría del territorio (**ver figura 2**).

**Déficit hídrico:** El Déficit Hídrico (DH), definido como la carencia de agua cuando la ETR excede la PP, evidenció una alta variabilidad espacial, con rangos que oscilan entre un déficit de -471 mm y un superávit de +2,101 mm. Se constató que la mayoría de las unidades de producción se localizan en áreas con DH negativo (*región roja*), donde la ETR supera consistentemente la PP, lo cual implica la necesidad imperativa de riego suplementario para evitar el detrimento en la calidad y cantidad del fruto. Las etapas fenológicas más vulnerables (*caída de pétalos, cuajado y crecimiento de fruto*,

durante los meses de abril a julio) coinciden con altos requerimientos de Kc. La zona de mayor probabilidad de estrés hídrico se delimitó a lo largo de la depresión del río Samalá hacia las llanuras del sur de Totoncapán, con un DH crítico menor a 1 mm/día}, riesgo que se acentúa durante la canícula. Las zonas con DH positivo (de 800 a >1,600 mm/día se restringen a las partes altas de la cordillera (ver figura 3).

**Pisos altitudinales:** La altitud es un factor fisiográfico determinante en la zonificación, debido a su correlación inversa con la temperatura y su influencia directa sobre la acumulación de Horas Frío (HF) y la incidencia de heladas. El análisis estadístico del Modelo Digital de Elevación (MDE) reveló una alta variabilidad orográfica en el área de estudio, con un rango de altitud que oscila entre 980 m.s.n.m. y los 3,720 m.s.n.m. Se observó que la mayoría de las unidades de producción de frutales deciduos, particularmente el melocotón, están concentradas en el rango de 2,001 m.s.n.m. a 2,400 m.s.n.m. Esta concentración se debe a que dicho piso altitudinal ofrece un balance térmico óptimo, caracterizado por un menor riesgo de heladas severas y una acumulación de HF favorable para la producción. La teoría del gradiente térmico vertical sugiere una disminución de aproximadamente de 0.5 °C por cada 100 m de ascenso, lo que implicaría una mayor acumulación de HF en altitudes superiores. Sin embargo, esta relación es modulada por el fenómeno de inversión térmica característico de las heladas por radiación. En estos eventos, las depresiones topográficas (zonas bajas) se vuelven más frías que las capas superiores, comprometiendo los cultivos establecidos en valles o llanuras. La cartografía altitudinal es crucial para la toma de decisiones agronómicas, ya que la incorrecta selección del piso puede inducir la floración temprana de cultivares de bajo requerimiento de frío, exponiéndolos a un mayor riesgo de daños por heladas tardías (ver figura 4).

**Necesidad de Riego Suplementario (DH):** La mayoría de las unidades productivas se encuentran situadas en áreas con un Déficit Hídrico negativo, acentuado durante la canícula. Esto establece la dependencia del cultivo al riego suplementario para asegurar el desarrollo óptimo del fruto durante las etapas críticas de crecimiento, independientemente del régimen pluviométrico anual.

## Recomendaciones

**Horas Frío (HF) y Selección Varietal:** Migración varietal estratégica: Se recomienda la sustitución progresiva de cultivares de alto requerimiento de frío (ej., melocotón 'Salcajá' con un requerimiento de 800 HF) de por variedades de bajo a medio requerimiento (300-550 HF). Esto es crucial para sincronizar la ruptura de la dormancia con la acumulación térmica real y evitar problemas de brotación irregular y baja calidad de fruto.

**Aprovechamiento de zonas bajas:** La Región de Baja Acumulación (301-400 HF) debe ser priorizada para la introducción de cultivares de bajo requerimiento de HF, maximizando la eficiencia productiva en zonas térmicamente limitadas.

**Uso de bioestimulantes:** En las áreas donde se mantengan cultivares tradicionales con déficit de HF, se recomienda la aplicación de rompedores de dormancia químicos (ej., cianamida de hidrógeno o aceites minerales) para forzar una brotación uniforme y adelantar la fenología.

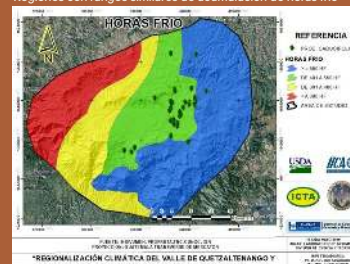
**Riesgo a Heladas:** Zonificación de riesgo: Se debe restringir el establecimiento de nuevas plantaciones en las zonas con riesgo severo (-6.1 °C), las cuales representan el 46.5% del territorio.

# Conclusiones

**Inadecuación Varietal por Déficit Térmico (HF):** Existe una disparidad crítica entre la acumulación real de Horas Frío y el requerimiento fisiológico de los cultivares dominantes (ej., melocotón 'Salcajá'). El 90% de la producción actual se localiza en zonas con un déficit térmico sustancial, comprometiendo la ruptura de la dormancia, la uniformidad de la floración y la longevidad productiva del huerto.

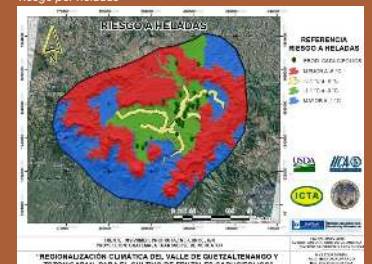
**Alto Riesgo Térmico Localizado:** Se identificó que el 46.5% del territorio está expuesto a riesgos de heladas severas (temperaturas inferiores a -6.0 °C), superando las temperaturas críticas de supervivencia TC10 y TC90 de las fases fenológicas más sensibles (floración y cuajado). Esto subraya la necesidad de implementar medidas urgentes de mitigación.

Figura 1 Regiones con rangos similares de acumulación de horas frío



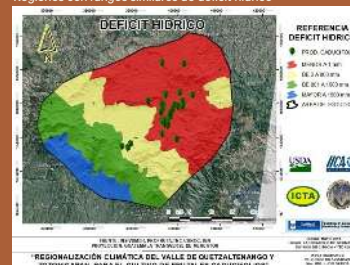
Nota. Elaboración propia

Figura 2 Regiones con rangos similares de temperaturas críticas al riesgo por heladas



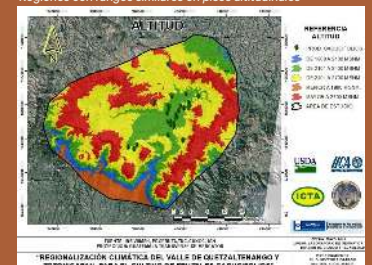
Nota. Elaboración propia

Figura 3 Regiones con rangos similares de déficit hídrico



Nota. Elaboración propia

Figura 4 Regiones con rangos similares en pisos altitudinales



Nota. Elaboración propia

**Tecnologías de mitigación activa:** En las zonas de riesgo alto a moderado (*ribera del río Samalá y llanura central, -1.1 °C a -6.0 °C*), se recomienda la implementación de sistemas de control de heladas pasivos y activos. Esto incluye el uso de riego por aspersión durante eventos de helada por radiación o la instalación de torres de viento para romper la inversión térmica.

**Manejo fisiográfico:** Se debe evitar la siembra de frutales en depresiones y fondos de valle, priorizando laderas y mesetas donde el riesgo de acumulación de aire frío por inversión térmica es menor.

**Déficit Hídrico (DH):** Instalación de riego prioritaria: En la zona de alto estrés hídrico (*depresión del río Samalá/sur de Totonicapán, DH < 1 mm/día, la instalación de sistemas de riego tecnificado (goteo) es indispensable para la viabilidad de la producción.*

**Programación del riego:** Se recomienda que la programación del riego se centre en las etapas críticas fenológicas (*cuajado de fruto y crecimiento de fruto, abril a julio*), donde la demanda hídrica del cultivo es máxima (*Kc alto*), asegurando la calidad y el calibre del fruto.

**Prácticas de conservación:** Promover la implementación de prácticas de conservación de humedad en el suelo, tales como el uso de *mulch* orgánico o plásticos, especialmente en las zonas de DH negativo, para reducir la ETR.

**Pisos Altitudinales:** Franja Óptima de Producción: Se debe orientar la expansión productiva hacia el piso altitudinal comprendido entre 2,001 msnm y 2,400 msn, identificado como el rango con el mejor equilibrio térmico-climático para el cultivo.

**Uso de MDE para Micro-Zonificación:** Utilizar el Modelo Digital de Elevación (*MDE*) como herramienta de gestión para realizar micro-zonificaciones a nivel de parcela, identificando y excluyendo del cultivo las áreas de acumulación de aire frío y las pendientes excesivas.

**Calderón Alcaraz, E. (1993).** Fruticultura general (3.ª ed.). Limusa.

**Carter Saavedra, S. (2009, abril 22).**

Regionalización. Blog Universitario. <http://www.sebaregionalizacion.blogspot.com/2009/04/regionalizacion-concepto.html>

**Castro Loarca, O. (1996).** El balance hídrico en la experimentación agrícola. Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícola.

**Díaz Montenegro, D. (1987).** Requerimiento de frío de frutales caducifolios. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos; Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agrícolas.

**Escobar H., E. (2008).** Evaluación de 10 tratamientos para extender la vida de anaquel del fruto del melocotonero (*Prunus persica* L. cultivar Salcajá). Universidad de San Carlos de Guatemala.

**Felicísimo, A. M. (1994).** Modelos digitales del terreno. Cáceres, España.

**Felicísimo, A. M. (1999).** La utilización de los modelos digitales del terreno en los estudios del medio físico. Cáceres, España.

**Giraldo Henao, R. (s. f.).** Introducción a la geostatística. Universidad Nacional de Colombia.

**González, I., & Alvarado, H. (1999).** Manual del cultivo de melocotón. MAGA, PROFRUTA.

**Gratacós N., E. (2007).** El cultivo del duraznero *Prunus persica* (L.) Batsch. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.

**Hargreaves, G. H., & Allen, R. G. (2003).** History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 129(1), 53-63. <https://doi.org/10.1061/~ASCE10733-9437~20031129:1~531>

**Hernández Palma, J. (2011).** Procesamiento digital de imágenes: Percepción remota. Chile.

**INSIVUMEH. (2011, agosto 18).** Boletines meteorológicos. <http://www.insivumeh.gob.gt/principal/alertas.htm>

**López M., O. H. (2007).** Recomendaciones para el cultivo del melocotón (*Prunus persica* Stokes) en el occidente de Guatemala. Universidad de San Carlos de Guatemala.

**MAGA. (2013).** El agro en cifras 2013. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación.

**Ola Huitz, R. B. (2005).** Efecto de la época de aplicación de cianamida hidrogenada como compensador de frío sobre la producción del melocotón (*Prunus persica*) variedad Salcajá, bajo condiciones del valle de Quetzaltenango. Universidad de San Carlos de Guatemala.

**Ruano Hernández, J. (2002).** El cultivo del melocotón (*Prunus persica* Stokes) en los departamentos de Chimaltenango y Sacatepéquez y sus perspectivas de desarrollo. Universidad de San Carlos de Guatemala.

**Steduto, P., Hsiao, T., Fereres, E., & Raes, D. (2012).** Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua. FAO. <http://www.fao.org/3/a-i2800s.pdf>

**Westwood, M. N. (2009).** Temperature-zone pomology: Physiology and culture. Timber Press.

# Referencias Bibliográficas

**Alvarado Quiroa, H. (1999).** Guía práctica para la protección contra heladas. PROFRUTA, Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación.

**Alvarado Quiroa, H. (2001).** Factibilidad agroclimática de la producción de frutales deciduos en el valle de Quetzaltenango. Universidad Rafael Landívar.

**Andalucía, Consejería de. (2010).** Sistemas de información geográfica. <http://sig.cea.es/SIG>

**Barrientos G., R. de. (2004).** Experiencias en la producción y comercialización del durazno (*Prunus persica*) en la comunidad de Santa María, Jalapa. Universidad de San Carlos de Guatemala.

## COMPARACIÓN de hierro, calcio, magnesio, fósforo y fibra en pastas convencionales y pastas con

## SUSTITUCIÓN PARCIAL de harina de trigo (*Triticum*

*aestivum*) por harina de amaranto (*Amaranthus cruentus*), chía (*Salvia hispánica*) y bledo (*Amaranthus hybridus L.*),

y su **aceptabilidad** por consumidores



**Autora:** Migdalia Azucena Ramírez Cuc

### Sobre la autora:

Migdalia Azucena Ramírez Cuc: *Ingeniera en alimentos (CUNSUROC-USAC 2025)*

# Resumen

El presente estudio tiene como objetivo, desarrollar y evaluar pastas alimenticias tipo fideo con sustitución parcial de harina de trigo (*Triticum aestivum*) por una mezcla de harina de amaranto (*Amaranthus cruentus*), chía (*Salvia hispanica L.*) y bledo (*Amaranthus hybridus L.*), evaluando su composición nutricional y aceptación sensorial del producto final.

La investigación incluye el desarrollo de tres formulaciones, análisis fisicoquímicos, espectrofotométricos y pruebas sensoriales con consumidores, utilizando la prueba de Friedman para detectar diferencias significativas. Los resultados, muestran incrementos en fibra y minerales y una aceptación sensorial adecuada.

Las tres muestras experimentales codificadas: 893 (Amaranto:50g, Chía; 45g y bledo: 30g) 674 (Amaranto:50g, Chía; 25g y bledo: 20g) y 125 (Amaranto:50g, Chía; 25g y bledo: 10g) con distintos porcentajes de sustitución y se compararon con pastas comerciales convencionales; el análisis incluyó la determinación del contenido de hierro, calcio, magnesio, fósforo y fibra soluble mediante métodos fisicoquímicos y espectrofotométricos. Realizado en el Laboratorio de Composición de Alimentos -LCA-, del Instituto de Nutrición de Centro América y Panamá -INCAP-. En los resultados obtenidos evidencian la existencia, estadísticamente significativa en el contenido de minerales y fibra.

Posteriormente aplicada la prueba de aceptación sensorial utilizando una escala hedónica de 9 puntos con panelistas entrenados en las instalaciones del Laboratorio de Evaluación Sensorial, ubicada en la Planta Piloto del Centro Universitario del Suroccidente. Tras emplear el análisis (ANOVA), las muestras obtuvieron una aceptación moderada, sin diferencias estadísticamente significativas.

Adicionalmente, se aplicó un panel de consumidores, conformado entre participantes del Centro Universitario del Suroccidente -CUNSUROC, USAC- y la Asociación pensamiento y corazón de las mujeres -ASPECOM-, concluyendo que hubo diferencia estadísticamente significativa en la aceptación de las muestras con un orden referente: 125, 674 y 893.

La incorporación de ingredientes locales y subutilizados en productos de consumo común como la pasta representa una estrategia viable para mejorar el perfil nutricional del alimento y aprovechar los cultivos ancestrales con alto valor nutritivo.

**Palabras clave:** Amaranto, chía, bledo, análisis sensorial.

# Introducción

Las pastas alimenticias son elaboradas en todo el mundo, siendo Italia el mayor productor, con un 48% del total producido a nivel mundial (Organization, 2015). En los últimos años su consumo se ha incrementado, dado su bajo costo, su fácil preparación y versatilidad, así como la longevidad de su vida de anaquel. Su preparación se basa en la deshidratación de las materias primas; comúnmente, sémola de trigo, harina de arroz y agua, inclusive otros ingredientes.

La presente investigación está vinculada al proyecto "Conocimiento Ecológico Tradicional para la Seguridad Alimentaria y Nutricional de Centroamérica. Participan el Centro Internacional de Estudios Políticos y Sociales (CIEPS) de Panamá, el Instituto Regional de Estudios en Sustancias Tóxicas (IRET-UNA) de Costa Rica (IRET-UNA) y el Centro Universitario de Occidente (CUNOC-USAC) en Guatemala, junto a la Asociación Pensamiento y Corazón de las Mujeres (ASPECOM). Estas instituciones colaboran para fomentar la participación equitativa de hombres y mujeres.

En este contexto, se desarrollaron y evaluaron tres formulaciones de pasta alimenticia mediante la sustitución parcial de harina de trigo (*Triticum aestivum*) por una mezcla de harinas de amaranto (*Amaranthus cruentus*), chíá (*Salvia hispánica*) y bledo (*Amaranthus hybridus*). El estudio analizó y comparó el contenido de: Hierro(Fe), Calcio(Ca), Magnesio(Mg), Fósforo(P) y fibra.

Los resultados obtenidos mediante la prueba estadística de Friedman permitieron identificar diferencias significativas entre las formulaciones "893", "674" y "125". La formulación "893" presentó mayores niveles de fibra y calcio, mientras que la "125" destacó por su mayor contenido de fósforo, hierro y magnesio. Estos hallazgos evidencian el potencial del uso de ingredientes tradicionales como sustitutos funcionales de la harina de trigo, permitiendo el desarrollo de un producto con perfil nutricional comparable e incluso superior al convencional, lo cual puede ser aprovechado.

Este enfoque no solo contribuye a la diversificación alimentaria con ingredientes locales y funcionales, sino que también apoya estrategias de seguridad alimentaria y nutricional en contextos vulnerables de Guatemala. El producto desarrollado fue sometido a una evaluación sensorial.

# Método

Esta información permite identificar los alimentos con mayor aporte nutricional y sustenta la selección de ingredientes para productos alimenticios más saludables.

Tabla 1  
Comparación nutricional de trigo, amaranto, chíá y bledo en 100 gramos.

Nutriente	Trigo	Amaranto	Chía	Bledo
Proteína (g)	10,33 g	14,45 g	4,2 g	17 - 24 g
Carbohidratos (g)	76,31 g	66,17 g	3,4 g	42 - 52 g
Fibra (g)	2,70 g	9,30 g	1,5 g	8,6 - 14,9 g
Grasa total (g)	0,98 g	6,51 g	0,4 g	3,8 - 4,6 g
Calcio (mg)	15,00 mg	153 mg	714 mg	130 - 170 mg
Hierro (mg)	108,00 mg	7,59 mg	16,4 mg	9 - 24 mg
Magnesio (mg)	22,00 mg	3,18 mg	390 mg	110 - 231 mg
Fósforo (mg)	1,17 mg	455 mg	1067 mg	28 - 36 mg

Nota: Adaptado de "Tablas de comparación de alimentos" (INCAP, 2017), J. Bressani & Rodas (2006); Cáceres (2015,2016). & Brown.

## Proceso de elaboración de harina de "amaranto (*Amaranthus cruentus*)", "chía (*Salvia hispánica*)" y "bledo (*Amaranthus hybridus* l.)":

**1) Recepción de materia prima:** Semillas de amaranto, chíá y bledo.

**2) Limpieza:** Lavado y desinfección (con agua purificada) de las semillas de amaranto y bledo para eliminar impurezas (tierra, insectos y piedras).

**2.1) Secado:** Colocar las hojas de bledo a secado natural, en moldes de aluminio, alrededor de 4 días por la mañana y tarde.

**3) Torrefacción:** Someter las semillas de amaranto (revientan) y chíá (tono tostado), a un proceso de tostado (sartén a fuego medio 160 a 180°C por 5 a 10 minutos), mover constante, hasta que revienten ligeramente.

**4) Procesado:** Licuar las semillas de amaranto (revientadas), chíá y bledo (hojas secas), hasta obtener una mezcla homogénea con consistencia de "harina / pulverizado", en un tiempo de 5 a 10 minutos.

**5) Filtrado:** Cernir la mezcla resultante utilizando un tamizador para obtener una textura fina y uniforme.

**6) Almacenado:** Resguardar la harina de amaranto en un frasco y resguardar.

## Proceso de elaboración de pasta "amaranto, chíá y bledo/quilete":

**1) Recepción de materia prima:** Harina de amaranto, chíá, bledo, agua, huevo, sal, y aceite.

**2) Activación de chíá:** Mezclar el agua con la chíá para hidratarla (5-10 minutos).

**3) Mezcla de ingredientes:** Mezclar las harinas, amaranto, bledo y la chíá hidratada; hasta obtener un producto homogéneo.

**4) Amasado:** Durante 10-15 minutos, hasta que esté suave y elástica. Esto puede hacerse a mano o utilizando un procesador de alimentos con el accesorio de masa.

**5) Reposo:** Envolver la masa en plástico film y dejar reposar durante 10 minutos (*temperatura ambiente o refrigerador*).

**6) Moldeado:** Dividir la masa en porciones pequeñas y estirar con el rodillo o máquina, para hacer pasta hasta alcanzar el grosor deseado.

**7) Moldeado:** Corte la masa en la forma de pasta deseada (*fettuccine, tagliatelle, espaguetis, etc.*) utilizando un cuchillo afilado o el cortador de pasta de la máquina.

**8) Deshidratado:** Con ayuda de un deshidratador a temperatura y tiempo (*40-50°C por 2-3 horas*). Puede realizarse por medio de secado artesanal (*24 a 48 horas*).

**9) Almacenado:** Almacenar la pasta en su empaque y guardar en un lugar fresco.

**10) Cocción:** en una olla grande, hierva abundante agua con sal, agregue la pasta y cocine durante 2-4 minutos. La pasta fresca se cocina más rápido que la pasta seca comercial, posteriormente escurra la pasta y enjuáguela ligeramente con agua fría para detener la cocción..

Tabla 2  
Formulación No. 893, pasta de (amaranto, chíya y bleado)

Ingredientes	Formulación 893	Formulación 674	Formulación 125
Harina de amaranto	23,15 %	22,22 %	33,11%
Harina de chíya	20,83 %	11,11 %	16,56 %
Harina de trigo	20,83 %	22,22 %	6,62 %
Agua	20,83 %	35,56 %	33,11%
Harina de bleado	13,89 %	8,89 %	9,93 %
Sal	0,46 %	----	0,66 %
<b>TOTAL</b>	<b>99,99 %</b>	<b>100 %</b>	<b>99,99 %</b>

Nota: Elaboración propia 2025

Otro factor importante, es el análisis sensorial que se consideraba, un método marginal para la medición de la calidad de los alimentos. No obstante, su desarrollo histórico ha permitido, que la aplicación de este análisis en la industria alimentaria sea reconocida como una de las formas más importantes para asegurar la aceptación del producto, mediante el consumidor (*García, 2018*).

El resultado aplicado dentro del laboratorio en minerales, fueron: hierro (*Fe*) AOAC. Método espectrométrico, calcio (*Ca*) espectrometría de emisión de plasma acoplado inductivamente, magnesio (*Mg*) espectrometría de emisión de plasma acoplado, fósforo (*P*) espectrometría de emisión de plasma acoplado y fibra AOAC. Y dato estadístico fue la prueba de Friedman (*no paramétrica*), utilizada para comparar el contenido de tres o más grupos relacionados cuando los datos no siguen una distribución normal.

Para, los panelistas conformados por los estudiantes de la carrera de Ingeniería en alimentos realizaron la prueba sensorial hedónica, evaluando: color, sabor, aroma y textura de los productos.

La escala a utilizar será la hedónica de nueve puntos, y cada muestra será codificada en un conjunto de tres dígitos aleatorios, con la finalidad de diferenciar cada muestra y ocultar su auténtica identificación.

Tabla 3  
Cuadro de escala hedónica

No.	Categorías	Código		
		893	674	125
9.	Me gusta muchísimo			
8.	Me gusta mucho			
7.	Me gusta bastante			
6.	Me gusta ligeramente			
5.	Ni me gusta ni me disgusta			
4.	Me disgusta ligeramente			
3.	Me disgusta bastante			
2.	Me disgusta mucho			
1.	Me disgusta muchísimo			

Nota: Elaboración propia 2025  
"Escala hedónica" (L. Taramona Ruiz & V. Quispe Wong, 2024).

# Resultados

Se presentan los resultados del análisis nutricional y sensorial de tres formulaciones de pasta con sustitución parcial de harina de trigo por amaranto, chíya y bleado, comparadas con pastas comerciales. Se evaluaron los contenidos de fibra, calcio, fósforo, hierro y magnesio, así como la aceptación sensorial mediante paneles entrenados y consumidores. Los datos fueron analizados con ANOVA y la prueba de Friedman para identificar diferencias significativas entre las formulaciones.

Tabla 4  
Análisis de Friedman, comparación entre pastas con sustitución y convencionales.

Evaluación	893	674	125	PASTA "L"	PASTA "M"	PASTA "MO"	PASTA SIMPLE	PASTA ESPAÑA								
Fibra	9,56	8	8,92	7	7,6	6	8,92	4	0	1	1,7	2	5	5	2,2	3
Calcio	310,75	8	293,15	6	294,25	7	293,15	5	9,8	2	18	4	0	1	13,75	3
Fósforo	199,65	8	194,15	5	229,9	7	194,15	2	0	2	0	2	258	8	99	4
Hierro	5,81	8	5,4	6	5,1	5	5,4	3	5,6	7	1	2	3,6	4	0,88	1
Magnesio	151,25	7	145,2	6	159,5	8	145,2	2	0	2	0	2	143	5	29	4
<b>Total</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
	7	0	3	3	6	4	2	3	5							

Nota: Elaboración propia 2025

Figure SEQ Figure \* ARABIC 1. Representación del análisis estadístico mediante la prueba no paramétrica de Friedman aplicada a las formulaciones de pasta con sustitución y convencionales.

$$\sum R_i^2 = 3 \cdot 7^2 + 3 \cdot 0^2 + 3 \cdot 3^2 + 1 \cdot 6^2 + 1 \cdot 4^2 + 1 \cdot 2^2 + 2 \cdot 3^2 + 1 \cdot 5^2$$

$$= 1369 + 900 + 1089 + 256 + 196 + 144 + 529 + 225 = 4708$$

$$\text{incógnita}_0^2 = \frac{12}{5 \cdot 8 \cdot 9} \cdot 4708 - 3 \cdot 5 \cdot 9$$

$$\text{incógnita}_0^2 = \frac{12}{360} \cdot 4708 - 135$$

$$\text{incógnita}_0^2 = 0.0333 \cdot 4708 - 135 \approx 156.9 - 135 = \boxed{21.9}$$

Nota: Elaboración propia 2025

Tabla 5  
Análisis de Friedman, comparación entre pastas convencionales

K	8
N	5
ESTADÍSTICO CALCULADO	21,9333333
GRADOS DE LIBERTAD	3
VALOR CRÍTICO	14,0671404
	5

Nota: Elaboración propia 2025

El total de rangos asignados por la prueba de Friedman también refuerza la superioridad nutricional de las formulaciones desarrolladas:

- **Formulación 893:** 37
- **Formulación 125:** 33
- **Formulación 674:** 30

Frente a las pastas comerciales, cuyos totales oscilaron entre 12 y 23.

Finalizando, como "estadístico calculado" (21,9) > "valor crítico" (14,07), se rechaza la hipótesis nula; hay diferencias estadísticamente significativas entre las formulaciones en cuanto a su contenido de fibra, calcio, fósforo, hierro y magnesio.

**Formulación de pastas alimenticias tipo fideo:** Las formulaciones desarrolladas con sustitución parcial de harina de trigo por harinas de amaranto, chí y bleo muestran una mejora significativa en el perfil nutricional respecto a pastas comerciales. La inclusión de estos ingredientes permite incrementar el contenido de proteína, fibra y minerales esenciales como calcio, hierro, magnesio y fósforo, contribuyendo a productos funcionales y nutricionalmente enriquecidos (Vázquez-Ovando, JA, Rosado-Rubio, G., Chel-Guerrero, LA, y Betancur-Ancona, DA, 2009).

#### Evaluación sensorial:

**Panel piloto:** El análisis de varianza (ANOVA) indicó que no existieron diferencias significativas entre las formulaciones en los atributos evaluados ( $p > 0,05$ ), con promedios hedónicos entre 5,28 y 6,32, correspondientes a "ni me gusta ni me disgusta" hasta "me gusta ligeramente". Esto demuestra que la sustitución parcial no afectó negativamente la aceptación sensorial (Gracia, 2020), (Delgado, 2018) y (Pérez, 2017).

**Panel de consumidores:** La prueba de Friedman evidenció diferencias significativas únicamente en el atributo olor en algunas formulaciones, mientras que color, sabor y textura no mostraron variaciones relevantes. Esto indica que la incorporación de harinas funcionales mantiene una uniformidad sensorial adecuada, especialmente en atributos críticos como textura y sabor.

**Comparación entre grupos culturales:** Los panelistas universitarios y miembros de ASPECOM percibieron diferencias similares en la mayoría de atributos, salvo en olor dentro del grupo universitario ( $\chi^2 = 6,45$ ;  $p < 0,05$ ), lo que evidencia la influencia del contexto cultural en la percepción sensorial (Tuorila, 2009).

#### Contenido de nutrientes:

**Entre formulaciones:** La formulación "893" destacó en fibra y calcio, mientras que la "125" presentó mayores valores de fósforo, hierro y magnesio. Estas diferencias permiten eleccionar formulaciones según necesidades nutricionales específicas (Vázquez-Ovando, JA, Rosado-Rubio, G., Chel-Guerrero, LA, y Betancur-Ancona, DA, 2009).

**Comparación con pastas comerciales:** Las formulaciones desarrolladas superan a las pastas convencionales en fibra (hasta 9,56 g por porción de 55 g), calcio (310,75 mg), fósforo (229,9 mg), hierro (5,81 mg) y magnesio (159,5 mg), representando coberturas relevantes de los requerimientos diarios de adultos (OMS, 2003), (INN, 2022), (Bressani, 2001) y (Coelho, MS, y Salas-Mellado, M., 2014). FAO (2013) y (Marcone, 2020) confirma que la combinación de amaranto, chí y bleo es efectiva para formular productos funcionales que mantienen aceptación sensorial y aportan nutrientes clave, especialmente en poblaciones con riesgo de deficiencias nutricionales; como niños, mujeres embarazadas, adultos mayores y comunidades rurales, quienes presentan alta incidencia de anemia, déficit de calcio, magnesio y fibra.

## Conclusiones

Se rechaza hipótesis nula, debido a que existe diferencia estadísticamente significativa en el contenido de hierro, calcio, magnesio, fósforo y fibra, entre la pasta con sustitución parcial de harina de trigo (*Triticum aestivum*) por harina de amaranto (*Amaranthus cruentus*), chí (*Salvia hispánica*) y bleo (*Amaranthus hybridus* L.) y la convencional.

Los resultados de la evaluación sensorial, oscilarán entre "ni me gusta ni me disgusta" y "me gusta ligeramente", indicando una aceptación moderada, entre las pastas convencionales y formulaciones con sustitución parcial. La evaluación sensorial entre los grupos UNIVERSIDAD y ASPECOM mostró una percepción homogénea en la mayoría de atributos, salvo por el olor en el grupo universitario, donde sí se detectan diferencias significativas. Esto resalta la influencia del contexto cultural en la percepción sensorial.

Se encontraron diferencias estadísticas significativas entre las formulaciones, cada una mostró ventajas nutricionales particulares: la formulación "893" destacó en fibra y calcio, mientras que la "125" lo hizo en fósforo, hierro y magnesio. Esto permite seleccionar formulaciones según objetivos nutricionales específicos sin comprometer el perfil general.

# Referencias Bibliográficas

**Bressani, R. (2001). Amarantho:** El cultivo de antaño y del futuro. . Boletín de Alimentación y Nutrición, 22(2), 103-104.

**Coelho, MS, y Salas-Mellado, M. (2014).** Caracterización química de la chía (*Salvia hispanica* L.) para su uso en productos alimenticios. Revista de Investigación en Alimentos y Nutrición, 2(5), 263-269.

**Delgado, M. (2018).** Efecto de la sustitución parcial del trigo por harinas funcionales en panes enriquecidos. Alimentos Hoy 34(2), 120-127.

**FAO, O. d. (2013).** Cultivos autóctonos olvidados: Redescubriendo los tesoros de la agricultura indígena. Obtenido de Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Roma.: <https://www.fao.org/>

**García, M. (Septiembre de 2018).** Obtenido de Análisis sensorial de alimentos.: <https://www.uaeh.edu.mx/scige/%20boletin/ic-bi/n3/m1.html#n1>

**Gracia, L. G. (2020).** Utilización de Pseudocereales en productos hornedados: Impacto nutricional y sensorial. Española de Nutrición Humana y Dietética.

**INCAP. (2017).** Guatemala: Serviprensa S.A. Obtenido de Tabla de composición de alimentos de Centroamérica: <https://www.sennutricion.org/media/tablas/INCAP.pdf>

**INN, I. N. (2022).** Tablas de composición de alimentos para Venezuela (6a ed.). Ministerio del Poder Popular para la Salud.

**L. Taramona Ruiz & V. Quispe Wong. (02 de Enero de 2024).** Universidad Le Cordon Bleu. Lima, Perú. Obtenido de Evaluación sensorial de un salami con extracto de un colorante en base de Ayrampo (*Opuntia soehrensii*): <https://revistas.ulcb.edu.pe/index.php/REVISTAULCB/article/view/294/549>

**Marcone, M. F. (2020).** Innovative and sustainable food production: using lesser-known and underutilized plant species for improving nutrition and food security. Journal of Food Bioactives, 9, 1-9. Obtenido de <https://doi.org/10.31665/JFB.2020.9211>

**OMS, O. M. (2003).** Informe de una consulta mixta de expertos OMS/FAO. OMS. Dieta, nutrición y prevención de enfermedades crónicas.

**Organization, I. P. (2015).** Ranking mundial de producción de pastas alimenticias. Obtenido de La pasta en números.: <https://pastay-salud.com/enumeros>

**Pérez, F. C. (2017).** Aceptación del consumidor y características sensoriales de productos de panadería enriquecidos. Food Quality and Preference 62., 27-35.

**Tuorila, H. &. (2009).** Sensory and consumer research in food product development. . Trends in Food Science & Technology, 20(10), 347-357.

**Vázquez-Ovando, JA, Rosado-Rubio, G., Chel-Guerrero, LA, y Betancur-Ancona, DA. (2009).** Propiedades fisicoquímicas de una fracción fibrosa de chía (*Salvia hispanica* L.). LWT – Ciencia y Tecnología de Alimentos, 42(1), 168-173.



# Implementación de **MAXENT** en **R** para estimar la distribución potencial de **OLIGONYCHUS PRATENSIS** en el cultivo de Maíz en **Guatemala**

**Autor:** Juan Estuardo Castillo Rios

**Sobre el autor:**

**Estuardo Castillo:** *Ingeniero Agrónomo (CUNOC, 2004) MSc. en Gerencia de Agricultura Sostenible y Recursos Naturales.*

## Resumen

La vigilancia epidemiológica efectiva para la sanidad vegetal requiere herramientas que permitan priorizar áreas de riesgo y optimizar los recursos de monitoreo. Este estudio desarrolla una metodología integral para el modelado de distribución potencial y el diseño de puntos de inspección para el ácaro *Oligonychus pratensis*, una plaga relevante en cultivos de maíz (*Zea mays*) en el occidente de Guatemala.

Se utilizaron registros geográficos de presencia correspondientes al período 2019–2024, combinados con variables bioclimáticas históricas de WorldClim. El modelado se realizó mediante el algoritmo MaxEnt, implementado en el entorno RStudio, lo que permitió integrar análisis estadístico, modelación y herramientas de sistemas de información geográfica (SIG) dentro del mismo flujo de trabajo.

Las predicciones de distribución potencial generadas por MaxEnt fueron recortadas a nivel departamental (Totonicapán, Quetzaltenango y Sololá) mediante el uso de shapefiles en R.

Los resultados muestran que el enfoque es reproducible, escalable y permite integrar criterios de riesgo, superficie cultivada y capacidad operativa. El modelo predice zonas prioritarias con alta probabilidad de presencia de la plaga, facilitando una planificación más eficiente de la vigilancia específica y la toma de decisiones.

Esta propuesta metodológica puede ser aplicada a otras plagas y regiones, fortaleciendo los programas de sanidad vegetal bajo un enfoque preventivo, territorial y basado en datos abiertos y replicables.

**Palabras clave:** MaxEnt, RStudio, vigilancia epidemiológica, SIG, muestreo estadístico, distribución de plagas,

*Oligonychus pratensis*, NIMF, MAGA, ICTA

# Introducción

La vigilancia es una actividad esencial para la protección fitosanitaria, y constituye la base técnica sobre la cual se sustentan medidas como el establecimiento de áreas libres de plagas, el análisis de riesgo, la certificación fitosanitaria y la erradicación de brotes. (FAO, 2006) De acuerdo con la Norma Internacional de Medidas Fitosanitarias NIMF 6. Vigilancia, la vigilancia permite a las Organizaciones Nacionales de Protección Fitosanitaria (ONPF) recopilar información confiable sobre la presencia, ausencia o distribución de plagas en un territorio determinado, tanto en cultivos como en la flora silvestre, almacenamientos y durante el transporte. Esta información es clave para garantizar la bioseguridad agrícola, facilitar el comercio internacional y proteger la biodiversidad y los medios de vida rurales. En este contexto, el fortalecimiento de los sistemas nacionales de vigilancia, a través de herramientas analíticas y tecnologías geoespaciales, resulta indispensable para implementar acciones preventivas y focalizadas de monitoreo fitosanitario. (FAO, 2018)

*Oligonychus pratensis* (Banks), conocido comúnmente como ácaro del maíz o ácaro del pasto, pertenece a la familia Tetranychidae y representa una plaga de creciente importancia económica en diversas regiones agrícolas de América. En Guatemala, ha sido asociado principalmente a cultivos de maíz (*Zea mays*), donde su presencia provoca clorosis foliar, debilitamiento fisiológico, reducción del área fotosintética y en casos severos, necrosis y pérdida significativa de rendimiento. (Mushtaq, 2024). Esta especie se caracteriza por formar telarañas finas en el envés de las hojas, interfiriendo en la fisiología del cultivo. (Reséndiz-García, 2018). El Departamento de Vigilancia Epidemiológica y Análisis de Riesgos del Ministerio de Agricultura (MAGA) reportó por primera vez su presencia en la región en 2019, y desde entonces el Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícola ICTA ha desarrollado estudios en un rango altitudinal de 2,323 a 2,852 msnm. Durante el período 2022–2023, se realizaron ensayos de campo para validar moléculas acaricidas y documentar su comportamiento, donde se observó una baja pero persistente infestación. Además, testimonios de agricultores confirman que esta plaga ha causado pérdidas totales en ciclos agrícolas recientes, especialmente cuando se combina con condiciones de sequía. La presión generada por esta plaga, su comportamiento altitudinal y la necesidad de manejo coordinado entre productores, subrayan la importancia de implementar sistemas de vigilancia específicos que permitan actuar con enfoque territorial, preventivo y técnicamente informado. (ICTA, 2024)

El algoritmo MaxEnt indica que la proyección de la distribución de hábitats apropiados para una especie se hace basado en el principio de máxima entropía que establece que la mejor aproximación de una distribución desconocida es aquella con entropía máxima (*la más dispersa*) sujeta a restricciones conocidas. Las restricciones están establecidas por el valor esperado de la distribución, el cuál es estimado a partir de las observaciones de presencia de una especie. Los modelos de distribución se obtienen por la estimación de la densidad de las variables ambientales condicionada por la presencia de las

especies. Al compararlo con otros métodos, MaxEnt ha demostrado tener un mejor rendimiento en cuanto a la eficiencia en la generación de modelos y la precisión de los resultados obtenidos. (Herrera Cervantes, 2012)

Ante esta necesidad, el presente estudio propone una metodología integral basada en herramientas de inteligencia espacial, estadística y modelado ecológico para apoyar la toma de decisiones en vigilancia epidemiológica fitosanitaria. Se combinan registros geográficos de presencia de la plaga, variables climáticas bioclimáticas y el algoritmo de máxima entropía (MaxEnt) para generar mapas de distribución potencial. Todo el flujo de trabajo fue implementado en el entorno RStudio, el cual permite integrar paquetes especializados como *dismo*, *terra*, *raster* y *sf*, favoreciendo un enfoque reproducible, automatizable y flexible (Phillips y otros, 2006). MaxEnt ha sido ampliamente validado como una herramienta robusta para estimar la idoneidad ambiental de especies en función de presencia conocida y condiciones ambientales, siendo especialmente útil en contextos donde la información de ausencia es limitada, como en el monitoreo de plagas. Además, se utilizaron herramientas de sistemas de información geográfica (SIG) dentro de Rstudio para la delimitación territorial mediante *shapefiles* oficiales (SEGEPLAN, 2025) y se diseñó una red de puntos de muestreo mediante métodos de muestreo aleatorio proporcional al área agrícola, ajustando el tamaño de muestra con fórmulas estadísticas recomendadas para vigilancia específica (FAO, 2018). Esta combinación de modelado predictivo, análisis espacial y estadística permite priorizar áreas de riesgo, optimizar el uso de recursos y fortalecer la vigilancia técnica en entornos agrícolas vulnerables.

Este enfoque permite priorizar zonas de intervención, mejorar la asignación de recursos y fortalecer la capacidad técnica de los programas de sanidad vegetal. El estudio se centra en los departamentos de Totonicapán, Quetzaltenango y Sololá, como casos de aplicación representativos de la región occidental del país, pero la metodología es escalable y replicable para otras plagas y territorios.

## Método

El estudio se llevó a cabo para todo el territorio nacional, pero se delimitó para los departamentos de Totonicapán, Quetzaltenango y Sololá, ubicados en el altiplano occidental de Guatemala, una región agroecológicamente diversa donde el cultivo de maíz (*Zea mays*) es dominante. La altitud de la zona varía entre 2,000 y 3,000 metros sobre el nivel del mar, lo que influye directamente en las condiciones climáticas y en la distribución de plagas como *Oligonychus pratensis*. El área agrícola se delimitó utilizando *shapefiles* proporcionados por la Infraestructura de Datos Espaciales publicada por SEGEPLAN y validados con información del MAGA.

Se utilizaron 99 registros geográficos de presencia de *Oligonychus pratensis*, recolectados entre 2019 al 2024 por profesionales de vigilancia epidemiológica del MAGA y apoyo del programa de extensión agrícola. Las coordenadas fueron depuradas en RStudio para eliminar errores espaciales,

duplicados o puntos fuera del área continental de Guatemala. Los datos se almacenaron en formato .csv con campos estandarizados (*longitud, latitud*) en coordenadas geográficas decimales.

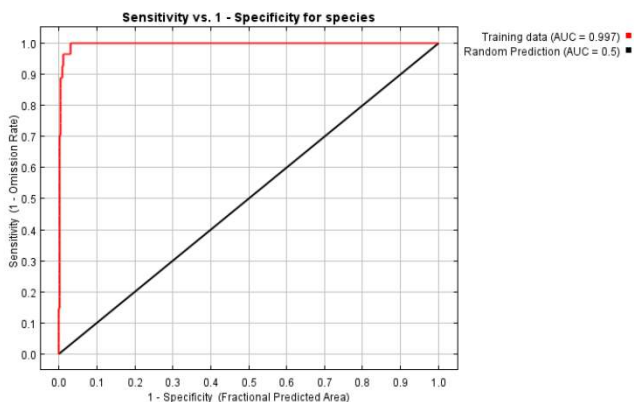
Se utilizaron 19 variables bioclimáticas del conjunto WorldClim v2.1 (1970–2000) en formato .asc, a una resolución de 30 arc-segundos (~1 km<sup>2</sup>) (Fick & Hijmans, 2017). Las capas fueron procesadas y apiladas en RStudio mediante los paquetes terra y raster, verificando que todas compartieran el mismo sistema de referencia espacial (J. Phillips y otros, 2025). No se aplicó reducción de variables por colinealidad, dado que MaxEnt maneja regularización automática, aunque se reconoce como posible mejora metodológica futura.

El modelado de distribución potencial se realizó utilizando el algoritmo MaxEnt (Phillips y otros, 2006), ejecutado desde RStudio mediante el paquete dismo. Se configuró el modelo con las siguientes opciones: randomseed=true, responsecurves=true y replicates=1. Se utilizó una división 80/20 para entrenamiento y validación, y los mapas de predicción generados se guardaron en formato .tif y .jpg.

El archivo maxent.jar fue utilizado desde RStudio, lo que permitió automatizar el flujo de trabajo y conservar el registro reproducible del proceso. La predicción nacional se recortó posteriormente a los límites departamentales usando herramientas SIG dentro de RStudio.

El modelo de distribución potencial de *Oligonychus pratensis* fue generado utilizando 99 registros de presencia y más de 10,000 puntos de fondo. La ejecución del algoritmo MaxEnt, con regularización automática y curvas de respuesta activadas, se realizó en RStudio a través del paquete dismo y la versión 3.4.3 de MaxEnt. El modelo alcanzó un AUC (Área bajo la curva) de entrenamiento de 0.997, lo que indica una excelente capacidad discriminativa. Asimismo, presentó una ganancia regularizada de 4.328 y una ganancia no regularizada de 4.809, lo cual sugiere que el modelo logró una alta separación entre los puntos de presencia y los de fondo.

Figura 1  
Área bajo la curva (AUC) del modelo Maxent



La tabla de contribuciones del modelo indicó que las variables con mayor influencia en la predicción fueron:

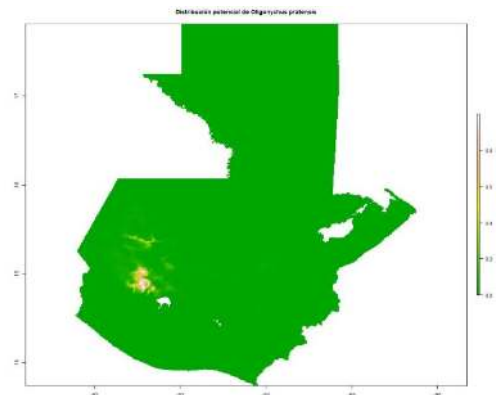
Tabla 1  
Tabla de contribución del modelo Maxent

Variable	Contribución (%)	Importancia por permutación (%)
Altitud (eiovgt)	27.1	3.9
Rango anual de temperatura	20.8	0.0
Precipitación del trimestre más húmedo	20.0	9.0
Temperatura mínima del mes más frío	14.4	63.3
Temperatura media mensual	5.2	0.1

Estas variables reflejan la relación entre la presencia de *O. pratensis* y condiciones ambientales frías y húmedas, lo cual coincide con los hallazgos del ICTA (2024) para el altiplano occidental guatemalteco. La temperatura mínima del mes más frío, en particular, mostró un peso relevante en la importancia por permutación (63.3%), lo que sugiere una fuerte dependencia ecológica de la especie con este umbral térmico.

Las curvas de respuesta mostraron una mayor probabilidad de presencia en rangos altitudinales de entre 2,200 y 2,800 m.s.n.m., y en zonas con precipitaciones superiores a 1,000 mm anuales, reforzando la hipótesis de que esta plaga está mejor adaptada a ecosistemas de altura y clima templado-húmedo. Estas predicciones fueron espacialmente coherentes con zonas de producción de maíz en Totonicapán y Quetzaltenango.

Figura 2  
Distribución potencial de *Oligonychus pratensis* en Guatemala



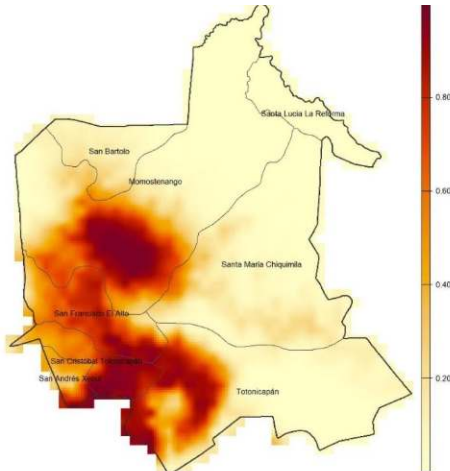
El archivo maxent.html también proporcionó umbrales óptimos para clasificar las predicciones, destacando una transformación asimétrica de 0.026 como punto de equilibrio entre sensibilidad y especificidad. Esta información es útil para finalizar el mapa de distribución e identificar áreas prioritarias para la vigilancia en campo.

El análisis de distribución potencial de *Oligonychus pratensis* a través del algoritmo MaxEnt permitió identificar zonas con mayor idoneidad climática para esta plaga en los departamentos del altiplano occidental de Guatemala. Se utilizaron variables bioclimáticas históricas, registros de presencia depurados y procedimientos SIG en RStudio para obtener mapas que evidencian patrones espaciales diferenciados, útiles para planificar vigilancia específica.

## Totonicapán

El análisis espacial revela que los municipios con mayor probabilidad de presencia de *Oligonychus pratensis* (>0.7) se concentran en el sur y suroeste del departamento: San Cristóbal Totonicapán, San Francisco El Alto, San Andrés Xecul, Totonicapán y Momostenango y en menor probabilidad esta Santa María Chiquimula. Estas áreas coinciden con zonas agrícolas de maíz de mediana altitud y alta vulnerabilidad. El uso del modelo permite identificar priorizaciones de vigilancia específicas por municipio, lo cual mejora la asignación de recursos técnicos.

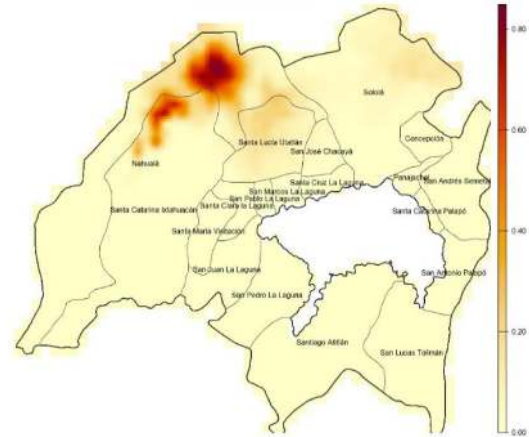
Figura 3  
Área con potencial de apareamiento de la plaga en el departamento de Totonicapán



## Sololá

En el caso de Sololá, las predicciones de presencia son más fragmentadas, localizadas principalmente en los municipios del norte como Nahualá y Santa Lucía Utatlán, mientras que bajo riesgo Sololá y San José Chacayá. Estos resultados reflejan condiciones micro climáticas específicas, probablemente vinculadas a la altitud y al uso agrícola del suelo. El resto de municipios, especialmente aquellos alrededor del Lago de Atitlán, presentan baja probabilidad de infestación, lo cual resulta útil para orientar la vigilancia fuera de zonas turísticas y de menor relevancia agrícola.

Figura 5  
Área con potencial de apareamiento de la plaga en el departamento de Sololá

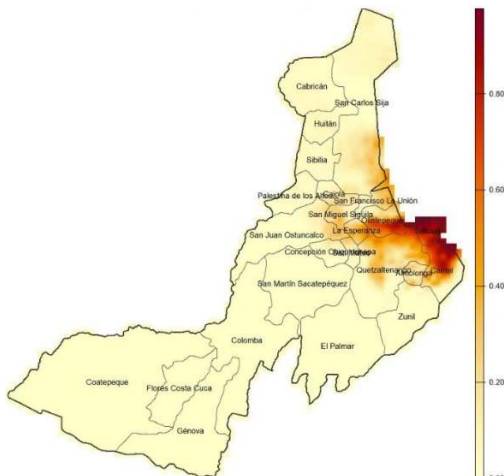


El modelo demuestra ser reproducible y escalable, y su integración con límites administrativos a nivel municipal permite generar mapas con alto valor operativo para los programas de vigilancia epidemiológica. La heterogeneidad en la distribución del riesgo entre municipios resalta la importancia de una vigilancia específica, que considere no solo la presencia histórica de la plaga, sino también las condiciones climáticas, topográficas y agrícolas.

## Quetzaltenango

En Quetzaltenango, los municipios con mayor idoneidad para la plaga incluyen Cantel, Salcajá, Quetzaltenango, Olinstepeque y La Esperanza y con menor probabilidad Almolonga, San Carlos Sija, San Francisco la Unión y San Miguel Siguilá, todos ubicados en el corredor agrícola oriental del departamento. La precisión del modelo destaca que el resto de los municipios presentan condiciones poco favorables, permitiendo enfocar los esfuerzos de vigilancia en zonas concretas. Esta diferenciación espacial es fundamental para reducir el número de inspecciones innecesarias.

Figura 4  
Área con potencial de apareamiento de la plaga en el departamento de Quetzaltenango



# Conclusiones

- Queda demostrada la utilidad del enfoque de modelado de distribución potencial mediante MaxEnt, implementado en el entorno RStudio, para identificar zonas de riesgo fitosanitario asociadas a *Oligonychus pratensis* en cultivos de maíz (*Zea mays*) en Guatemala.
- Los resultados evidencian que la plaga presenta una afinidad marcada por zonas de mediana a alta altitud (entre 2,200 y 2,800 m.s.n.m.), con condiciones climáticas frescas y húmedas, características presentes en los departamentos de Totonicapán, Quetzaltenango y Sololá.
- La integración de registros de presencia, variables bioclimáticas y análisis espacial en R permitió generar mapas de predicción con alta resolución y aplicabilidad operativa, facilitando la priorización territorial para acciones de vigilancia específica y manejo preventivo.

- La visualización de los resultados mediante SIG y la superposición de límites departamentales y municipales permitió traducir los resultados técnicos en insumos prácticos para la toma de decisiones en programas de sanidad vegetal.

# Referencias Bibliográficas

**FAO. (2006).** NIMF 1: Principios fitosanitarios para la protección de las plantas y la aplicación de medidas fitosanitarias en el comercio internacional (Revisada). Convención Internacional de Protección Fitosanitaria (CIPF). CIPF. <https://doi.org/https://www.ippc.int/>

**FAO. (2018).** NIMF 6 Vigilancia. Roma: CIPF. FAO.  
Fick, S., & Hijmans, R. (2017). WorldClim 2: nuevas superficies climáticas con resolución espacial de 1 km para áreas terrestres globales. *International Journal of Climatology*, 4302-4315.

**Herrera Cervantes, A. A. (2012).** Aplicación de tecnologías de información para modelar la distribución de plagas. Costa Rica: Universidad de Costa Rica.

**ICTA. (2024).** Diagnóstico del daño ocasionado por el ácaro del maíz (*Oligonychus pratensis*) y su manejo. Quetzaltenango: ICTA.

**J. Phillips, S., Miroslav, D., & E. Schapire, R. (21 de 05 de 2025).** Maxent software for modeling species niches and distributions (Version 3.4.1).  
[http://biodiversityinformatics.amnh.org/open\\_source/maxent/](http://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent/)

**Mushtaq, H. M. (2024).** Evaluación morfotaxonómica del complejo de especies *pratensis* con desarrollo ontogenético y redescrición de *Oligonychus pratensis* (Banks) (Acari: Prostigmata: Tetranychidae). *Diversity*, 12(765), 16.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.3390/d16120765>

**Phillips, S. J., Anderson, R. P., & Schapire, R. E. (2006).** Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 231-259.

**Reséndiz-García, B. (2018).** Identificación de los ácaros asociados al maíz (*Zea mays* L.) en la Comarca Lagunera. *Agroproductividad*, 2(3).

**SEGEPLAN. (2025).** Infraestructura de Datos Espaciales Guatemala. <https://ideg.segeplan.gob.gt/geoportal/>



# PROBLEMAS actuales en la CADENA DE VALOR

de la miel en Guatemala

**Autor:** Eduardo Rafael Vital Peralta

## Sobre el autor:

**Eduardo Rafael Vital Peralta:** Lic. en Economía (CUNOC, 1982), MSc. en Economía y planificación del desarrollo (1986, Universidad Nacional Autónoma de Honduras).

## Resumen

Sin pretender abordar todos los problemas por los que atraviesa la cadena de miel en Guatemala, este ensayo trata de señalar los más importantes en cada uno de los eslabones de este importante producto que constituye uno de los rubros de exportación que genera empleo e ingresos a numerosas familias de la república.

Se señalan los problemas más visibles en cada uno de los eslabones, descritos de acuerdo a Michael Porter quien indica que los eslabones de la producción en la cadena de valor se dividen en dos categorías: Actividades primarias y Actividades de apoyo (Porter M, 1985)

En las actividades primarias los eslabones son: Logística de entrada, Producción, Logística de salida, Marketing y ventas y Servicio. En las actividades de apoyo están los eslabones de Infraestructura de la empresa, Gestión de recursos humanos, Desarrollo de Tecnología y finalmente el Abastecimiento. (Porter M, 1985).

La visualización de los problemas en la cadena de valor que se presentan en este artículo se deriva de la experiencia del autor como Coordinador de la Cadena de Miel del Programa de Consorcios Regionales -CRIA- del Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura -IICA- así como de las investigaciones realizadas de 2016 a 2024 en el contexto de la temporalidad de este programa por investigadores de los Centros Regionales de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

**Palabras clave:** Cadena de valor, Apicultura en Guatemala, Problemas, Desafíos.

## Introducción

El análisis de esta problemática se hace desde la teoría de las Cadenas de Valor expuesta por Michael Porter (Porter M, 1985)

### Actividades primarias:

**1) Logística de entrada:** Recepción, almacenamiento y gestión de materias primas y suministros.

**2) Producción:** Transformación de materias primas en productos finales.

**3) Logística de salida:** Almacenamiento y distribución de productos terminados.

**4) Marketing y ventas:** Promoción y venta de productos a los clientes.

**5) Servicio:** Soporte y asistencia a los clientes después de la venta.

## Actividades de apoyo:

**1) Infraestructura de la empresa:** Gestión general, planificación y finanzas.

**2) Gestión de recursos humanos:** Reclutamiento, capacitación y desarrollo de empleados.

**3) Desarrollo de tecnología:** Investigación y desarrollo de nuevas tecnologías y procesos.

**4) Abastecimiento:** Adquisición de materias primas, suministros y servicios.

En cada uno de los eslabones, tanto de las actividades primarias como de las actividades de apoyo se señalan problemas que, sin que sean los únicos, son importantes para tratar de encontrar soluciones a los mismos.

**Método:** El método que se utiliza es con un enfoque cualitativo basado en el análisis de literatura, experiencias de expertos y análisis comparativo.

**Resultados y discusión:** Se presenta a continuación en el orden de las actividades primarias y las de apoyo, los problemas que existen en la cadena de valor de la miel partiendo de la definición del concepto de Cadena de Valor:

## ¿Qué es una cadena de Valor?

Según Michael Porter, una cadena de valor es un modelo que describe las actividades que una empresa realiza para crear valor para sus clientes. La cadena de valor ayuda a las empresas a identificar áreas de mejora y oportunidades para crear valor para los clientes y aumentar la competitividad en el mercado. Al analizar y optimizar cada actividad en la cadena de valor, las empresas pueden reducir costos, mejorar la calidad y aumentar la eficiencia. (Porter, M, 1985)

# Actividades primarias

## Logística de entrada:

Recepción, almacenamiento y gestión de materias primas y suministros.

En la cadena de valor de la miel, la logística de entrada se identifica básicamente con la actividad de las abejas en el panal. Y el insumo principal para que las abejas produzcan la miel es la flora circundante. En la región suroccidental se caracterizaron más de 120 especies de plantas entre las que se clasifican como flores de polen, que son las que producen polen, rico en proteínas y otros nutrientes esenciales que las abejas recolectan para alimentar a sus crías y a sí mismas; las flores de néctar que producen un líquido dulce y energético que las abejas utilizan como fuente de energía y que a través

de sus órganos especializados transforman en miel; y las flores mixtas que producen tanto polen como néctar y que las hace atractivas para una amplia variedad de polinizadores como las abejas, las mariposas y otros insectos y pequeños mamíferos como los murciélagos. (Vital, E., 2018)

En otra investigación realizada con apicultores del municipio de Cuilco, departamento de Huehuetenango (Celada, 2020), también se estableció la relación entre la flora apícola y la diferenciación de miel de abeja y entre los problemas identificados está nuevamente la deforestación que afecta a las abejas y a la diversidad natural del país.

En el contexto de este eslabón se identifican como problemas los siguientes:

No existen productores de flores especializados que abastezcan a los apicultores con las especies requeridas, tanto de flores poliníferas, nectaríferas y mixtas, lo que se complementa con los procesos de deforestación que se realiza en diferentes zonas de las regiones del país para dar paso a los cultivos de plantación, especialmente a la producción de Palma Africana (*Elaeis guineensis*), Banano (*Musa paradisiaca*), y la caña de azúcar (*Saccharum officinarum*), cultivos que no dependen exclusivamente de la actividad de las abejas para su reproducción y que en Guatemala estos cultivos constituyen un peligro para las abejas debido a las frecuentes fumigaciones que requieren y que ha obligado a los apicultores a tener sus apiarios lejos de estas zonas.

De igual manera se identificó que los apicultores, especialmente los pequeños y medianos, no conocen los rangos altitudinales y de temperatura en que se desarrollan mejor las abejas, lo que limita la productividad de estas cuando se ubican en zonas no aptas para su desarrollo. (Vital E, 2018).

El otro problema que se encuentra en este eslabón es el referido a la alimentación complementaria de las abejas. En toda la región suroccidental y en otras regiones del país, la tradición de los apicultores es alimentar a las abejas con jarabe de azúcar y no se recurre a otras opciones de alimentación que garanticen el mantenimiento del panal, especialmente en épocas de escasa o nula floración.

En el programa CRIA-IICA se desarrollaron dos estudios experimentales: el primero de ellos se realizó en apiarios de la Cooperativa Integral de Apicultores del Sur Occidente de Guatemala (COPIASURO), en la que evaluaron suplementos alimenticios para abejas como sustitutos del polen (Rodríguez P, 2019) y su respectiva validación sobre el tema de la alimentación alternativa en un dominio de recomendación de 6 localidades de Chanchicupe, Tajumulco y en la Escuela de Formación Agrícola -EFA- localizada en la aldea Caxaque del municipio de San Marcos, cabecera del departamento del mismo nombre así como al municipio de San Pedro Sacatepéquez, San Marcos. (Rodríguez, P, 2022). En otra investigación experimental se evaluó el efecto de tres dietas alimenticias: la que usa el productor que es jarabe de azúcar y se confrontó con otras opciones: jarabe de azúcar más huevo crudo, jarabe de azúcar más harina de frijol negro (*Phaseolus sp*)

y jarabe de azúcar más harina de haba (*Vicia faba L*) (Contreras Julio, 2019).

En la línea de la investigación para el control de plagas en el programa CRIA se realizaron varias investigaciones y algunas validaciones. Entre ellas destacan las siguientes:

Los problemas relacionados con las plagas que afectan a las abejas también se han abordado a través de diversas investigaciones desarrolladas en el contexto del programa de Consorcios Regionales de Investigación Agropecuaria -CRIA-IICA-, tales como la varroasis provocada por Varroa destructor, el ataque del Pequeño Escarabajo de Colmenas, pec, Aetina tumida que es un insecto que causa estragos en las colmenas y que ya fue detectado en la región norte de Guatemala y que requiere la atención para contener su propagación.

De igual manera, la hormiga melaloncha, que es específicamente una mosca – Melaloncha roneii y Megaselia scalaris parasitan a las abejas Apis mellifera ha sido detectada en varias regiones del país y constituye un problema que es necesario erradicar para lograr la sanidad de las colmenas y el consiguiente daño en la merma de la producción de miel.

“Se ha reportado la presencia de dos especies de moscas parasitarias en el sur occidente de Guatemala. Por esta razón se sugiere la vigilancia y control. También se recomienda que los métodos de control sean basados en la biología de las moscas, las buenas prácticas en el apiario, así como la restauración del paisaje natural” (E. Enríquez, et al).

La nebulización con orégano (*Lippia graveolens*) y eucalipto (*Eucalyptus camaldulensis*) para el control alternativo de Varroa (Barrios Morales, Carlos, 2019)

Siempre en el tema del control de Varroa destructor, se realizó un experimento y su respectiva validación utilizando diversas dosis de tintura de propóleo, asperjadas sobre las colmenas para erradicar el daño que este ácaro hace sobre la población de abejas, especialmente sobre las crías.

Otras investigaciones orientadas al control de plagas de las abejas también se mencionan los experimentos realizados por el Ing. Pablo López quien utilizando distintas metodologías de control hizo aportes importantes para el control de Varroa destructor. (López, Pablo, 2019) entre las que están el control con distintas dosis de tintura de propóleo así como con hongos entomopatógenos, de las que se hicieron sendas validaciones.

Así mismo, se realizó experimento y su respectiva validación del uso de hongos entomopatógenos para el control de Varroa destructor, y que se confrontó con el control tradicional del apicultor. El experimento se realizó en apiarios de San Pablo, San Marcos y la validación en localidades de San Marcos y Sololá. El resultado de esta validación indica que el control de Varroa destructor es más efectivo con una combinación de ambos hongos entomopatógenos en un porcentaje considerable con respecto al testigo en el que no se realizó control. (López, Pablo, 2019).

Se desarrolló también el experimento y su respectiva validación del uso de tintura de propóleo en diferentes proporciones para el control de Varroa destructor. El experimento se realizó en la Aldea Tanil del municipio de Esquipulas Palo Gordo, del departamento de San Marcos (Barrios, Carlos, 2019) y la respectiva validación realizada en municipios de San Marcos y de Sololá. (García, Otoniel, 2023).

También en el contexto de los insumos, es fundamental la dotación de abejas reinas de calidad que permitan mantener la población de abejas en la colmena para garantizar la producción de miel que cosecha el apicultor. En el Centro de Transferencia de Tecnología Apícola de MOSCAMED, ubicado en el municipio de Río Bravo, Suchitepéquez, se ha realizado desde hace ya algún tiempo los procesos de producción de abejas reinas que han sido distribuidas en la región para mejorar la productividad en las colmenas (Rivera Raul, 2020)

### **Producción: Transformación de materias primas en productos finales**

En este eslabón los problemas principales que se señalan son los siguientes: espacios inadecuados para los procesos de transformación, equipo y maquinaria insuficiente, escasos conocimientos en los procesos industriales que generen productos derivados de la colmena y escasa producción de miel que no compite en el mercado internacional en una escala que prometa incrementar los ingresos de los apicultores. De igual manera, la trazabilidad de la producción, entendida esta como la auditoría del proceso desde los insumos hasta la producción final, generalmente no cumple con los estándares internacionales para la exportación, y son muy pocos los apicultores y las organizaciones de apicultores que cumplen celosamente con alcanzar los indicadores requeridos por los compradores internacionales, lo que genera, en la mayoría de los casos, rechazo de contenedores.

Lo anterior se debe fundamentalmente a que en la región no existen laboratorios de análisis que permitan verificar las condiciones de la miel y otros subproductos para la exportación y se tiene que recurrir a laboratorios ubicados en los Estados fronterizos de la República de México, vecinos a Guatemala en donde sí existe este servicio, especialmente los que están vinculados a las universidades tales como el Colegio de la Frontera Sur y la Universidad del Estado de Chiapas. En general en los Estados de Chiapas, Campeche, Yucatán y Quintana Roo existen estos laboratorios, dado que la frontera sur se genera una buena parte de la producción de miel para la exportación en México.

### **Logística de salida: Almacenamiento y distribución de productos terminados**

La problemática del almacenamiento y la distribución de productos terminados se concentra en los siguientes aspectos: los pequeños y medianos productores que no están organizados, tienen procesos de almacenamiento precarios y generalmente sus métodos y equipo de transformación es rudimentario, por lo que se dedican a almacenar exclusivamente la miel, la que pueden ofrecer a intermediarios que establecen los precios en función sólo de sus intereses sin importar los costos de producción. Existen acopiadores que

almacenan la miel para luego exportarla y el sistema de pago es variado, ya que algunos, cuando el productor les lleva la miel, inmediatamente les pagan el importe del producto; pero existen otros intermediarios que reciben la miel a consignación y requieren varios meses para pagarles a los productores.

Los productores pequeños, medianos y grandes productores que están asociados a alguna cooperativa o asociación ya tienen mejores perspectivas puesto que algunas ya han implementado espacios adecuados para el almacenamiento de miel, tienen equipo para homogenizar, lo mismo para la transformación de otros productos derivados como el propóleo, polen, jalea real y otros productos que ya requieren procesos industriales o semi-industriales, como los jabones, champús y otros.

En el país no hay producción de equipo apícola de calidad, por lo que se debe importar, lo que muchas veces no está en las posibilidades financieras de las cooperativas y asociaciones.

### Marketing y ventas: Promoción y venta de productos a los clientes

El problema básico en este eslabón es que el consumo en el mercado interno de los productos del panal es muy reducido. "El consumo per cápita de miel en Guatemala varía según las fuentes y el año de referencia. A continuación algunos datos disponibles:

- 40 gramos por persona al año: Según el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAGA), este es el consumo per cápita de miel en Guatemala, mencionado en un estudio de 2014.
- 38-40 gramos por persona al año: Entre 2016 y 2019, el consumo aparente de miel de abeja osciló entre 38.2 y 39.3 gramos/persona/año, con una tasa de crecimiento media anual del 0.9%, según datos no específicos del MAGA pero posiblemente relacionados.

Es importante tener en cuenta que estos datos pueden no reflejar el consumo actual, ya que la información disponible es de años anteriores. (MAGA, 2019)

Se realizaron dos investigaciones relacionadas con los conocimientos ancestrales sobre los usos de la miel en poblaciones de origen maya (Sánchez M, Luis, 2018) y otra relacionada con la cultura popular, usos y consumo de miel en tres cabeceras departamentales, Huehuetenango, Quetzaltenango y San Marcos, (Sánchez M, Luis, 2020) en el que se determinó que el consumo promedio per cápita al día es de 0.97 gramos, lo que constituye un consumo interno muy bajo, que es indicador de que la población en general desconoce las propiedades nutritivas de la miel y que el producto en el mercado nacional resulta oneroso comparado con otros edulcorantes.

### Servicio: Soporte y asistencia a los clientes después de la venta

En esta parte de la cadena de la miel no se ha establecido un sistema de soporte y asistencia a los clientes, toda vez que lo común es que el consumidor adquiera la miel, ya sea en los supermercados o en las tiendas de las localidades en donde

se produce la miel. En la mayoría de las veces, es la miel que se ha envasado artesanalmente con etiquetas que tienen alguna información nutricional del producto especialmente cuando el productor ya ha realizado el respectivo registro en el Registro Guatemalteco Apícola -REGAPI- que garantiza la calidad y la trazabilidad de la miel. Pero este conocimiento es aún muy limitado y las personas tienen ideas equivocadas con respecto al tema de la calidad de la miel. Por ejemplo, la mayor parte de la población cree que cuando la miel se cristaliza es porque las abejas han sido alimentadas con azúcar y que la miel de calidad no se cristaliza. Este criterio es equivocado ya que el correcto es que la miel de calidad tiende a cristalizarse cuando las temperaturas ambientales bajan. Es el caso de la miel que se genera en las zonas costeras y se vende en el altiplano del país.

# Actividades de apoyo

### Infraestructura de la empresa: Gestión general, planificación y finanzas

Como se indicó arriba, la infraestructura de las asociaciones y cooperativas apícolas pueden calificarse en general de débiles, especialmente aquellas asociaciones o cooperativas que no han establecido un buen mercado internacional. De esta forma puede haber una escala de calificación de dichas organizaciones, existiendo avances importantes que permiten identificarlas como las más avanzadas en este rubro: Entre ellas, COPIASURO, Cooperativa Santa María Nebaj, Cooperativa de Apicultores de El Petén, COADAP, Asociación Bella Flor del Monte en Todos Santos Cuchumatán, Asociación Red de Apicultores para el Desarrollo Sostenible del Suroccidente- ARAPIS- que han logrado vínculos con países que importan miel, especialmente europeos y asiáticos. Pero algunas no han despegado y su actividad se ha reducido al acopio de la miel de los asociados y lograr la venta, especialmente a intermediarios locales que no ofrecen precios adecuados para los productos de la colmena que los apicultores generan.

### Gestión de recursos humanos: Reclutamiento, capacitación y desarrollo de empleados

Como se indicó arriba, la infraestructura de las asociaciones y cooperativas apícolas pueden calificarse en general de débiles, especialmente aquellas asociaciones o cooperativas que no han establecido un buen mercado internacional. De esta forma puede haber una escala de calificación de dichas organizaciones, existiendo avances importantes que permiten identificarlas como las más avanzadas en este rubro: Entre ellas, COPIASURO, Cooperativa Santa María Nebaj, Cooperativa de Apicultores de El Petén, COADAP, Asociación Bella Flor del Monte en Todos Santos Cuchumatán, Asociación Red de Apicultores para el Desarrollo Sostenible del Suroccidente- ARAPIS- que han logrado vínculos con países que importan miel, especialmente europeos y asiáticos. Pero algunas no han despegado y su actividad se ha reducido al

copio de la miel de los asociados y lograr la venta, especialmente a intermediarios locales que no ofrecen precios adecuados para los productos de la colmena que los apicultores generan.

#### Desarrollo de tecnología: Investigación y desarrollo de nuevas tecnologías y procesos.

La experiencia en el CRIA-IICA hizo resurgir el interés en la academia por la investigación en los múltiples problemas de la cadena. Se partió de las necesidades de los apicultores a través de un estudio diagnóstico y luego se involucró a más de 30 docentes investigadores de los Centros Regionales del área del sur-noroccidente del país, así como a estudiantes que recibieron capacitación y tuvieron la experiencia de conectarse con el mundo de la apicultura.

Pero al concluir este programa, el financiamiento terminó y la alternativa que queda es gestionar recursos para continuar y consolidar los avances que se han logrado hasta la fecha.

Y en cuanto a la tecnología, hace falta que se implemente adecuadamente a las organizaciones de apicultores para que, siguiendo las normas de trazabilidad, garanticen la calidad del producto para consumo humano por medio de las buenas prácticas apícolas, lo que requiere financiamiento para las respectivas capacitaciones. Una cosa es ser apicultor empírico y otra cosa es ser apicultor técnicamente formado.

En la misma línea de la tecnología hace falta establecer por lo menos un laboratorio de análisis de la calidad de la miel para que a través de las buenas prácticas apícolas y la respectiva trazabilidad, los productos de la colmena tengan una receptividad tanto en el mercado interno como en el mercado tradicional.

De igual manera es necesario capacitar personal para las tareas de la contabilidad y el registro de las finanzas de las organizaciones de apicultores. En una investigación realizada sobre este tema (Vital, 2018) se pudo detectar que este aspecto es débil y que es necesario reforzarlo para garantizar el éxito de estas empresas.

#### Abastecimiento: Adquisición de materias primas, suministros y servicios

En relación al abastecimiento de materias primas, suministros y servicios, la oferta en el mercado interno responde a un nivel intermedio de calidad. Existen todos los elementos tales como el azúcar, la cera, las cajas, las herramientas para el manejo de las colmenas, así como los productos que se orientan al control de plagas en el apiario, pero generalmente son muy pocos los vendedores afectando esto en los precios para los apicultores. Las cooperativas y las Asociaciones han superado parcialmente el tema de los precios adquiriendo al por mayor los insumos con lo que favorecen a los asociados.

Los intermediarios han ocupado un lugar en las operaciones de adquisición de materias primas, suministros y servicios especialmente cuando en las localidades no están al alcance de los apicultores.

## Conclusiones

- Los problemas de la cadena de miel en Guatemala siguen vigentes y requieren de la atención del Gobierno y especialmente de la academia.
- Las plagas que afectan a la colmena persisten y las investigaciones realizadas han permitido identificar a la mayoría de dichas plagas, pero se requieren más estudios para la generación de tecnologías que permitan reducir el impacto de dichas plagas.
- El desarrollo industrial en el procesamiento de los productos de la colmena está retrasado en nuestro país, en relación al vecino México.
- Los problemas existentes en los procesos de trazabilidad de la producción no se han generalizado y esto genera desventaja con respecto al mercado externo.
- Se requiere más impulso en el desarrollo de técnicos en apicultura y que las instituciones como las universidades, el ICTA y el MAGA le pongan atención y presupuesto a este tema.
- Es posible que los estudios se hayan estancado en simple información y no se da seguimiento para la promoción y transferencia entre los productores

## Referencias Bibliográficas

- Barrios Morales, Carlos y Julio Contreras García. 2019.** Nebulización con orégano (*Lippia graveolens*) y eucalipto (*Eucalyptus camaldulensis*) para el control alternativo de *Varroa destructor*. CRIA-IICA
- Barrios Morales, Carlos y Julio Contreras García. 2019.** Efecto de tinturas de propóleo para el control de *Varroa destructor* en *Apis mellifera*. CRIA-IICA
- Celada Maldonado, Advani Ottoniel. 2020.** Identificación de flora apícola y análisis para diferenciación de miel de abeja en Cuilco, Huhuetenango. CRIA-IICA
- Contreras García, Julio. 2019.** Evaluación de tres dietas alimenticias para abejas (*Apis mellifera*) en época lluviosa, San Pedro Sacatepéquez, San Marcos. CRIA-IICA
- Enríquez E, et al. 2024.** Moscas parasitarias de abejas (*Apis mellifera*) en la región cafetalera noroccidente y suroccidente de Guatemala: métodos de detección, evaluación morfológica, genética y control. CRIA-IICA

**García Otoniel. 2023.** Validación de la tintura de propóleo para el control de varroa en apis mellivera en 5 municipios de la costa sur de Quetzaltenango. CRIA-IICA.

**López Xicará, Pablo Osmani. 2019.** Efecto de hongos entomopatógenos *Beauveria bassiana*, *Metarhizum ansopliidae* y combinación para control de Varroa destructor en abeja europea, en San Pablo San Marcos, Guatemala.

**López Xicará, Pablo Osmani y Katy Ortiz Bámaca. 2024.** Validación del control biológico de Varroa Destructor en apicultura. CRIA-IICA.

**Porter, Michael. 1985.** Competitive Advantage: Creating and Sustaining Superior Performance. Editorial: Free Press (una division de Simon & Sch)

**Rodríguez Castillo, Laura Paulina. 2019.** Suplementos alimenticios como sustitutos del polen, sobre crías de abejas y su efecto en la colmena. CRIA- IICA.

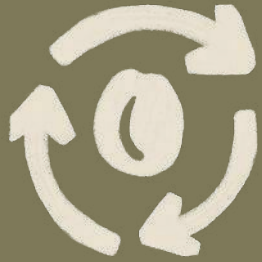
**Rivera Raúl, et al. 2020.** Mejoramiento de abejas (*Apis mellifera*) para aumentar la productividad de colonias ante el cambio climáticos. CRIA-IICA

**Sánchez Midence, Luis Arturo, et al. 2018.** Sistematización de los conocimientos ancestrales sobre los usos de la miel en grupos étnicos de ascendencia maya, del occidente de Guatemala. CRIA-IICA

**Vital Peralta, Eduardo Rafael. 2018.** Caracterización botánica y geográfica de la flora apícola en la región suroccidental de Guatemala. CRIA-IICA.

**Vital Peralta, Eduardo y Vicente Chaj. 2019.** Rentabilidad de la producción apícola en dos cooperativas del suroccidente de Guatemala.

# En la era del **CONSUMISMO**: Sostenibilidad y economía circular



## en el **SISTEMA DE EMBALAJE** y

comercialización de **ARCLA** Café

**Autora:** Taraly Santos

### **Sobre la autora:**

**Taraly Santos:** *Bachiller en ciencias y letras. Tesista de Ingeniería en Gestión Ambiental Local CUNOC-USAC.*

## Resumen

El presente estudio analiza la implementación de un modelo de economía circular en las fases finales de la cadena de suministro del café orgánico producido por ARCLA, integrando la evaluación del embalaje y la comercialización. En el contexto actual dominado por patrones de consumo acelerado, caracterizado por una producción masiva, ciclos de vida cortos y la alta generación de residuos, la investigación propone alternativas sostenibles basadas en la valorización de recursos, pensamiento sistémico y corresponsabilidad entre productor y consumidor.

Se empleó una metodología cuantitativa, transversal, no experimental y correlacional-causal; apoyada en auditorías ambientales, matriz de Leopold (*Modificada*), indicadores de sostenibilidad y encuestas sobre la percepción del consumidor. Los resultados mostraron impactos favorables derivados del reemplazo del envase plástico por vidrio reciclado y la mejora del embalaje utilizado para el transporte y comercialización del producto, permitiendo una reducción en la generación de residuos, optimización energética y fortalecimiento de la percepción ambiental de la marca.

El estudio confirma que, la economía circular puede transformar sistemas tradicionales de producción y comercialización, demostrando que pequeñas agroindustrias pueden avanzar hacia una transición más resiliente, sustentada en consumo responsable, innovación y trazabilidad.

**Palabras clave:** Economía circular, Sostenibilidad, Consumo Responsable, Gestión Ambiental.

## Introducción

La era actual se caracteriza por el consumismo, entendido como un modelo social basado en adquirir bienes y servicios más allá de las necesidades reales, impulsado por el mercado y el estímulo constante a la compra. Este fenómeno se diferencia del consumo responsable, que es la acción normal y necesaria de adquirir bienes y consecuentemente del consumo responsable, que implica seleccionar productos considerando impactos ambientales y socioeconómicos a mediano y largo plazo.

La relación entre consumismo y crisis ambiental es directa: mayor demanda, mayor extracción de recursos, procesos acelerados, envases desechables y creciente generación de residuos; todas ellas, problemáticas socioambientales que ponen en riesgo la viabilidad de la sostenibilidad. Frente a este escenario, la economía circular emerge como un enfoque que permite extender el ciclo de vida de los productos, minimizar los residuos y optimizar el uso de recursos en todas las fases de producción, transformación, comercialización, uso y disposición final (*Ver figura 1*). Es importante reconocer que, la circularidad no puede concebirse como una acción aislada, sino como el resultado de una interrelación e integración de

esfuerzos entre distintos sectores y actores sociales, desde el individuo en la adopción de hábitos de consumo inteligentes y responsables que permite disminuir aquellos impactos ambientales cotidianos, hasta el nivel empresarial que tiene como responsabilidad prioritaria el rediseñar bienes y servicios bajo criterios de sostenibilidad, resiliencia y ecodiseño; los gobiernos, por su parte, deben generar marcos normativos, políticas públicas, infraestructura y canales de financiamiento que permitan la viabilidad de modelos como este. Tal como lo expresa CEPAL (2021) *“Expandir la economía circular requiere el trabajo conjunto de todos los actores involucrados, mejorar la información y una visión integral que conlleve cambios en las políticas, sistemas de gestión, la inversión y el ciclo de vida de los productos”*.

Para el sector cafetalero, estas tensiones se amplifican por la competencia internacional, la presión de certificaciones ambientales y el incremento en expectativas del consumidor. Por ello, el presente estudio analiza el sistema de embalaje y comercialización de ARCLA, diferenciando claramente:

**Empaque:** Material utilizado para proteger o presentar el producto (*etiquetas, tapas, sellos*)

**Embalaje:** Todo el material externo que tiene contacto directo con el producto (*En este caso, los frascos de vidrio*)

Siendo así que, el estudio se estructuró en los siguientes elementos:

**Pregunta central:** ¿Cómo influye la implementación de prácticas de economía circular en el sistema de embalaje y comercialización de ARCLA Café?

**Variables:** Sostenibilidad, material de embalaje, eficiencia energética, percepción del consumidor, reducción de residuos.

**Objetivo general:** Analizar las prácticas de economía circular en las etapas de embalaje y comercialización de café orgánico como mecanismo de sostenibilidad de la finca Arcla.

**Hipótesis:** Las actividades de embalaje y comercialización del café en la finca Arcla café orgánico impulsan prácticas sostenibles de producción, aunque no están exentas de generar impactos ambientales. Sin embargo, es posible evaluar el desempeño de los principios de la economía circular mediante indicadores específicos en su cadena de suministro.

## Herramientas utilizadas:

**Auditoría ambiental:** Evaluación sistemática de procesos para identificar consumo de recursos, generación de residuos y oportunidades de mejora sostenible.

**Matriz de Leopold modificada:** Instrumento para valorar impactos positivos o negativos sobre componentes ambientales y socioeconómicos.

**Indicadores de sostenibilidad:** Emisiones, consumo energético, reciclabilidad, retornabilidad, residuos evitados, entre otros (SEMARNAT, 2011).

**Encuestas de percepción del consumidor:** Evaluaron preferencia de materiales, disposición a pagar, disposición a retornar envases y percepción de valor ambiental.

## Composición del sistema de embalaje:

Previo al cambio, ARCLA utilizaba bolsas plásticas tipo Doypack como embalaje, con la transición se implementaron:

**Empaques:** Cajas de cartón reciclado resistente para transporte mayorista, con reducción del uso de plástico secundario, tapas metálicas y esmerilado en los frascos de vidrio.

**Embalaje:** Frascos de vidrio reciclado de grado alimenticio, fabricados por el grupo vidriero VICAL y su planta en Guatemala VIGUA, (*Ver figura 2*) caracterizados por aportar en los distintos ámbitos de la sociedad: económico, financiero y ambiental, a través de su iniciativa *“Por un mundo limpio como el vidrio”*.

El 95.24% de los materiales utilizados en envase y embalaje fueron reciclables, lo cual aumenta la circularidad del sistema productivo, cabe mencionar que, “Reciclar vidrio permite un ahorro de energía del 2 al 3% por cada 10% de cullet (*pedaceria de vidrio*) que se agrega a la fórmula. Además, se disminuye sosteniblemente la cantidad de residuos sólidos que llegan a vertederos o rellenos” (*grupovical, s.f.*).

## Eficiencia energética y descarbonización:

Uno de los objetivos fundamentales en la transición hacia un modelo de economía circular para ARCLA café ha sido la reducción de la huella de carbono asociada a sus procesos productivos. Para lograrlo, se implementaron acciones enfocadas a la eficiencia energética como en la disminución de las emisiones indirectas generadas por los sistemas de embalaje y comercialización, enmarcando estas iniciativas dentro de una estrategia integral de descarbonización. En este sentido, experiencias de otras compañías como Carlsberg

# Metodología

La investigación se desarrolló bajo un enfoque **cuantitativo, no experimental, transversal y correlacional causal**, con el objetivo de relacionar mejorar en el sistema de embalaje y comercialización con impactos ambientales y percepciones. Cabe mencionar que, el presente estudio se desarrolló entre julio y diciembre de 2024 en la finca ARCLA café, San Rafael Pie de la Cuesta, San Marcos.

muestran que avanzar hacia la neutralidad de carbono en sus procesos productivos constituye una estrategia clave de sostenibilidad (ExpokNews, 2020).

En relación con el consumo energético del sistema de embalaje, la auditoría energética reveló que las etapas de etiquetado y sellado representaban un consumo de 44.20 kWh mensuales, lo cual constituye un 20% del consumo eléctrico total. A través de la reorganización de los horarios de operación la optimización de procesos y la implementación de buenas prácticas, se obtuvo una reducción mensual de 4.42 kWh. Este ajuste resulta en un consumo mensual total de 216.58 kWh en los sistemas productivos, evidenciando una mejora operativa sin comprometer la calidad del proceso.

Adicionalmente, se evaluaron las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) asociadas a la distribución del producto en los distintos puntos de comercialización. A partir de la estimación del consumo de combustible en el transporte, equivalente a 804.75 L de diésel anuales, se calculó una emisión total de 2,124.36 kg de CO<sub>2</sub> al año. Esta cifra es comparable a la cantidad de dióxido de carbono que aproximadamente 96 árboles adultos podrían absorber en un año, utilizando parámetros promedio de fijación de carbono en los ecosistemas (US EPA, 2023). Este análisis sostiene un marco de referencia para el desarrollo de futuras estrategias de compensación o mitigación de la huella de carbono.

#### Desempeño ambiental:

Derivado del análisis integral del sistema de embalaje y comercialización del café orgánico en ARCLA, se obtuvieron los siguientes resultados:

- Reducir 22.55% de residuos no reciclables.
- Lograr una tasa de reciclaje del 95.24% del vidrio.
- Reducir 4.42 kWh mensuales mediante mejoras operativas.
- Fortalecer recuperación de envases mediante el programa de "Retorno 100% y residuo cero". Mediante el cual los consumidores retornan los envases a cambio de descuentos, alcanzando una tasa de retorno del 41.38%.

La matriz de Leopold, (Ver figura 3) mostró impactos negativos moderados en uso del recurso hídrico, pero positivos en empleo, dinamización económica y reducción de pasivos ambientales a largo plazo.

#### Evaluación sobre el consumo responsable:

Las encuestas mostraron:

- 56.62% calificó el envase como excelente por estética, confiabilidad e identidad ambiental.
- 41.38% expresó disposición a devolver los envases para reutilización.
- Los encuestados manifestaron que decisiones de compra ya no se basan solo en apariencia y precio, sino también en atributos ambientales del embalaje.

Esto demuestra una transición del simple consumo hacia un consumo responsable, apoyado en corresponsabilidad productor-cliente.

# Conclusiones

La corrección del enfoque evidencia que la economía circular en ARCLA no se limita al cambio en los sistemas de embalaje y comercialización, sino al rediseño integral del embalaje, empaque y comercialización, ofreciendo resultados ambientales y económicos medibles. Desde un enfoque técnico, este estudio demuestra que la economía circular no debe limitarse a la gestión de residuos, sino que puede funcionar como una estrategia transversal de innovación, eficiencia y diferenciación de mercado.

- En un contexto dominado por el consumismo, el consumo responsable emerge como una vía eficaz para reducir presiones ambientales del mercado.
- La transición de embalajes de plástico a vidrio, permitió reducir residuos, fortalecer la trazabilidad y mejorar la percepción del consumidor.
- El sistema se mantiene técnica y operacionalmente viable, incluso para pequeñas unidades productivas.
- El modelo es replicable en el sector cafetalero nacional con acompañamiento en políticas públicas, reciclaje, educación y financiamiento.

El tránsito hacia un modelo de economía circular requiere de la articulación efectiva de múltiples actores sociales. A nivel individual la adopción de hábitos de consumo inteligente permite reducir los impactos ambientales cotidianos mediante la prolongación del ciclo de vida de los productos. Desde el ámbito empresarial, existe una corresponsabilidad ineludible en rediseñar productos bajo criterios de durabilidad, reparabilidad y reciclabilidad, conforme a los principios del ODS 12 "Producción y consumo responsable" y paralelamente, los gobiernos deben desempeñar un papel facilitador mediante la formulación de políticas públicas orientadas a minimizar residuos, promover infraestructura de gestión integral y garantizar mecanismos financieros que permitan la implementación operativa de sistemas circulares.

# Referencias Bibliográficas

**Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). (2021).** Economía circular en América Latina y el Caribe: oportunidad para una recuperación transformadora. Naciones Unidas. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/47309-economia-circular-america-latina-caribe-oportunidad-recuperacion-transformadora>

**DePeru.com. (s.f.).** Infografía de la línea de economía circular en el diagrama verde [Imagen]. DePeru.com.



# Generación de **RESIDUOS** y **DESECHOS SÓLIDOS** domiciliarios y su gestión en el **ÁREA URBANA**



del municipio de **Santa Cruz La Laguna**, Sololá, Guatemala

**Autora:** Devi Nadeyra Lorena Escobar Monge

## Sobre la autora:

**Devi Nadeyra Lorena Escobar Monge:** *Bachiller en ciencias y letras. Tesista de Ingeniería en Gestión Ambiental Local, CUNOC-USAC*

**Asesor de investigación:** **Gabriel Paolo Gamboa,** *Profesor interino, División de Ciencia y Tecnología, CUNOC. MSc. Planificación y gestión territorial de los riesgos del agua y del medio ambiente. (USAC).*

## Resumen

Este estudio analiza la generación, gestión de residuos y desechos sólidos domiciliarios en el área urbana del municipio de Santa Cruz La Laguna, Sololá, Guatemala. A través de un enfoque metodológico mixto, se recopiló datos cuantitativos mediante encuestas y análisis gravimétricos, así como cualitativos a través de entrevistas semiestructuradas, grupos focales y observación participante. Los resultados indican una producción per cápita promedio de 0.69 kg/hab/día, con una fuerte predominancia de residuos orgánicos (64.56 %) y una densidad media de 289.21 kg/m<sup>3</sup>. La caracterización reveló diferencias significativas según estrato socioeconómico, siendo el estrato bajo el de mayor generación diaria. El modelo actual de gestión fue evaluado como deficiente debido a deficiencias normativas, logísticas e institucionales. Se identificaron limitaciones en la cobertura del servicio, falta de infraestructura adecuada y escasa separación en origen. A pesar de ello, se reconocen oportunidades de mejora a través del fortalecimiento institucional, la participación comunitaria y la articulación interinstitucional. Se proponen recomendaciones como la educación ambiental, el compostaje de residuos orgánicos, el desarrollo de normativa municipal y la planificación de un relleno sanitario. Este estudio ofrece insumos para la formulación de políticas locales basadas en evidencia, alineadas con la legislación nacional vigente y los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

**Palabras clave:** Gestión de residuos, caracterización de residuos, compostaje, Santa Cruz La Laguna

## Introducción

La gestión de residuos sólidos constituye uno de los principales desafíos ambientales para los municipios rurales de Guatemala, especialmente aquellos ubicados en áreas con alta sensibilidad ecológica, como la Cuenca del Lago de Atitlán. En el municipio de Santa Cruz La Laguna, Sololá, se han evidenciado limitaciones estructurales, técnicas, sociales que dificultan la implementación de un modelo de gestión integral de residuos y desechos sólidos domiciliarios.

La problemática se ve agravada por la limitada cobertura del servicio de recolección, la ausencia de normativas locales específicas, la saturación del centro de transferencia y la persistencia de prácticas inadecuadas como la quema y el entierro de residuos. A pesar de estas condiciones, se identifica una oportunidad importante: la disposición comunitaria para participar en iniciativas de separación en origen, reciclaje y compostaje, así como la existencia de alianzas interinstitucionales emergentes.

El objetivo de este estudio fue analizar las características de la generación de residuos sólidos domiciliarios, evaluar el modelo actual de gestión municipal y proponer estrategias

sostenibles orientadas a fortalecer la gestión ambiental local. La investigación adopta un enfoque integral, combinando herramientas cuantitativas y cualitativas para ofrecer un diagnóstico técnico y participativo que permita orientar acciones municipales y comunitarias en el corto y mediano plazo.

# Método

Se aplicó un enfoque de investigación descriptiva y aplicada, con una estrategia metodológica mixta. El área de estudio abarcó el área urbana del municipio de Santa Cruz La Laguna, Sololá. Para la recolección de datos se utilizó:

- **Encuestas domiciliarias** a 98 viviendas seleccionadas mediante muestreo aleatorio estratificado, orientadas a conocer prácticas de manejo, percepción y disposición hacia la separación y valorización de residuos.
- **Caracterización de residuos sólidos**, desarrollada durante una semana, siguiendo los lineamientos del MARN y adaptados al contexto local, para determinar la cantidad y composición promedio generada por hogar.
- **Entrevistas semiestructuradas** a actores clave tales como: Autoridades municipales, técnicos de las siguientes instituciones: Dirección de Gestión Ambiental Municipal (DIGAM) de la Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca del Lago de Atitlán y su Entorno (AMSCLAE) y de Atitlán Recicla, para evaluar el modelo actual de gestión.
- **Matriz de evaluación institucional**, con parámetros de calificación (*Excelente, Bueno, Regular, Deficiente*) aplicada a dimensiones como cobertura, normativas, infraestructura y capacidad técnica.

El análisis de datos cuantitativos se realizó con apoyo de Excel. Los datos cualitativos fueron procesados mediante análisis temático.

Tabla 1  
Cálculo del total de muestras tomadas

Estrato	% de la población	Número de muestras	15% adicional	Total de muestras
Alto	5 %	4	1	5
Medio	40 %	34	5	39
Bajo	55 %	47	7	54
<b>TOTAL</b>	<b>100 %</b>	<b>85</b>	<b>13</b>	<b>98</b>

Nota: Tomado de Guía para elaborar Estudios de Caracterización de residuos sólidos comunes, MARN, 2022.

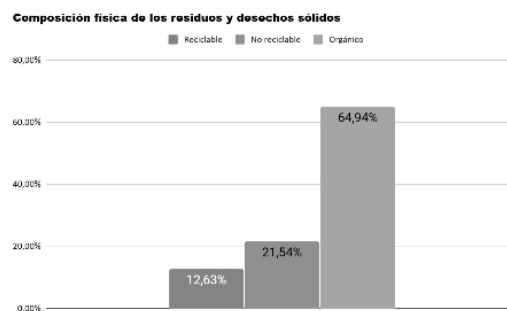
# Resultados

## Generación y manejo de residuos domiciliarios:

Los resultados de la caracterización evidenciaron que la generación promedio de residuos sólidos domiciliarios en el área urbana de Santa Cruz La Laguna fue de 0.69 kg por hogar

por día, una cifra que se encuentra dentro de los rangos observados en contextos rurales de Guatemala, pero que supera los reportados en algunos municipios con sistemas de gestión consolidados. En cuanto a la composición, la fracción orgánica constituye el componente predominante dentro de los residuos, siendo el 64.94%, lo que representa una oportunidad significativa para implementar estrategias de valorización como el compostaje. Le siguen en importancia las bolsas plásticas (6.68%) y el papel sanitario (6.42%), reflejando una significativa presencia de residuos no reciclables de uso cotidiano. Los residuos reciclables como cartón (4.54%), PET (2.80%), y vidrio (2.93%) están presentes en menores cantidades, lo que sugiere potencial de valorización si se implementa una correcta separación en la fuente. Los residuos con menor proporción, como el plástico y aluminio laminado (0.13%) y tetrapack (0.46%), son más difíciles de gestionar por su baja presencia y complejidad de reciclaje.

Ilustración 1  
Categorización de la composición física de residuos y desechos sólidos comunes



Nota: Elaboración propia.

La encuesta domiciliar mostró que el 93.4 % de los hogares realiza algún tipo de separación en origen, principalmente entre residuos orgánicos y no reciclables. Este dato positivo refleja un nivel elevado de conciencia ambiental, aunque muchas veces la separación no está sistematizada ni acompañada por una adecuada recolección diferenciada. No obstante, el 6.6 % de las viviendas aún recurre a prácticas inadecuadas como la quema y el entierro de residuos, principalmente por falta de infraestructura, ausencia de incentivos y deficiencias en la cobertura del servicio municipal.

En términos de frecuencia de eliminación, el 74.5 % de los hogares elimina sus residuos una vez por semana, lo que coincide con la frecuencia del servicio de recolección prestado por la municipalidad. Sin embargo, la acumulación prolongada de residuos en los hogares plantea riesgos sanitarios, especialmente durante la temporada de lluvia, cuando se observan desbordes y proliferación de vectores.

La población manifestó una alta disposición a modificar sus prácticas si se fortalecen los servicios municipales y se implementan programas de educación ambiental continuos. Además, se identificó que existe interés comunitario en participar en proyectos de compostaje, jornadas de limpieza y reciclaje, lo que constituye una base social importante para avanzar hacia modelos de gestión más sostenibles.

## Evaluación institucional del modelo de gestión de residuos:

Para evaluar el modelo actual de gestión de residuos sólidos en el municipio, se establecieron cuatro criterios técnicos: cobertura del servicio, existencia de normativa, infraestructura operativa, capacidad técnica y administrativa. Cada criterio fue calificado según los parámetros: Excelente, Bueno, Regular y Deficiente. El modelo general fue calificado como "Deficiente", debido a limitaciones estructurales y operativas persistentes.

**Cobertura del servicio:** Se observó que la recolección municipal tiene un alcance limitado, concentrándose en el casco urbano y dejando sin atención a zonas de difícil acceso como callejones y áreas periféricas. Esta exclusión provoca prácticas informales de disposición, especialmente en comunidades con acceso restringido por la topografía del terreno.

**Normativa:** No existe una ordenanza municipal específica sobre residuos sólidos. La DIGAM opera sin un reglamento técnico ni plan estratégico, lo que limita la capacidad de control, fiscalización e implementación de acciones coordinadas con actores locales e interinstitucionales.

**Infraestructura:** El centro de transferencia se encuentra colapsado, sin condiciones adecuadas para la clasificación, almacenamiento temporal ni seguridad ocupacional. No se cuenta con infraestructura para el manejo de residuos reciclables o compostables. Esta situación obstaculiza el cierre del ciclo de residuos y dificulta la articulación con programas regionales de valorización.

**Capacidad institucional:** La DIGAM opera con personal mínimo y sin formación especializada en gestión de residuos. Se identifican esfuerzos por coordinar acciones interinstitucionales, pero estos dependen de la voluntad política del momento y carecen de sostenibilidad a largo plazo.

## Propuesta de estrategias sostenibles para mejorar el modelo de gestión:

Con base en los resultados obtenidos, se formularon un conjunto de estrategias orientadas a transformar el modelo actual hacia una gestión integral, participativa y sostenible:

**1. Fortalecimiento institucional y normativo:** Es indispensable dotar a la DIGAM de mayor capacidad operativa mediante la contratación de personal técnico, la aprobación de normativas municipales específicas, la elaboración de un plan estratégico que permita la planificación y ejecución efectiva de acciones.

**2. Mejora de infraestructura y cobertura del servicio:** Se propone la restauración del centro de transferencia, adecuándolo para la recepción diferenciada de residuos. Asimismo, se recomienda ampliar la cobertura de recolección a través de estudios de accesibilidad y adquisición de vehículos adecuados a la geografía del municipio.

**3. Valorización de residuos orgánicos:** Dada la alta proporción de residuos orgánicos, se sugiere implementar programas de compostaje comunitario y escolar,

promovidos por la municipalidad y en alianza con organizaciones locales. Esto permitirá reducir el volumen de residuos enviados a disposición final y generar abono para huertos familiares.

**4. Educación y participación ciudadana:** La implementación de campañas permanentes de educación ambiental con enfoque intercultural puede fortalecer la conciencia comunitaria y fomentar la separación en origen, la reducción del consumo y el rechazo de prácticas inadecuadas.

**5. Planificación regional e interinstitucional:** Se destaca la necesidad de formalizar alianzas con entidades gubernamentales y de la sociedad civil, e iniciar los estudios técnicos necesarios para la construcción de un relleno sanitario municipal o intermunicipal que garantice la disposición final segura de los residuos no valorizables.

# Conclusiones

El presente estudio permitió evidenciar que la gestión de residuos y desechos sólidos domiciliarios en el área urbana del municipio de Santa Cruz La Laguna enfrenta importantes desafíos técnicos, institucionales y sociales. A partir del análisis integral de la generación, caracterización y manejo de residuos, así como de la evaluación del modelo actual de gestión, se identificaron múltiples debilidades estructurales que limitan la efectividad del sistema municipal.

Desde el punto de vista técnico, los residuos generados presentan una alta proporción de materia orgánica, lo cual representa una oportunidad para la implementación de programas de valorización mediante compostaje. La población muestra niveles elevados de conciencia ambiental, reflejados en una tasa de separación en origen superior al 90%, así como una disposición favorable a participar en programas comunitarios. Sin embargo, la falta de infraestructura adecuada, como centros de acopio funcionales y recolección diferenciada, impide que estas prácticas se consoliden de forma sostenida y efectiva.

A nivel institucional, la evaluación del modelo de gestión, realizada mediante criterios técnicos, arrojó una calificación general de "Deficiente", lo cual se explica por la limitada cobertura del servicio, la carencia de normativa local específica, el colapso del centro de transferencia y la escasa capacidad operativa de la DIGAM. Si bien se identificaron esfuerzos aislados por parte de la municipalidad y sus aliados, estos aún no logran consolidarse en un sistema integral, planificado y sostenible.

No obstante, también se identificaron potenciales claves de mejora. Entre ellos, destacan la existencia de alianzas emergentes con instituciones como AMSCLAE y Atilán Recicla, la articulación de una mesa técnica interinstitucional y la participación comunitaria como eje articulador del cambio. Estos elementos brindan condiciones favorables para transitar hacia un modelo de gestión integral y participativo.

En ese sentido, se concluye que para avanzar hacia una gestión sostenible de los residuos sólidos en Santa Cruz La Laguna, es imprescindible implementar un conjunto de estrategias articuladas que incluyan: el fortalecimiento institucional y normativo del gobierno local; la restauración y adecuación de la infraestructura existente; la ampliación de la cobertura de recolección con criterios de accesibilidad; la promoción de la valorización de residuos orgánicos; y la consolidación de alianzas interinstitucionales para la planificación de largo plazo. La aplicación de estas medidas permitirá reducir los impactos ambientales y sanitarios actuales, proteger los ecosistemas del Lago de Atitlán y mejorar la calidad de vida de la población.

**Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. (2021).** Acuerdo Gubernativo 164-2021. Guatemala.

**Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. (2022).** Acuerdo Ministerial Número 500-2022. Guatemala.

**Municipalidad de Santa Cruz La Laguna. (2024).** Población del Municipio de Santa Cruz La Laguna, Sololá, Guatemala. Santa Cruz La Laguna.

**Municipalidad de Santa Cruz La Laguna, Sololá. (2024).** ORGANIGRAMA MUNICIPALIDAD DE SANTA CRUZ LA LAGUNA, SOLOLÁ. Santa Cruz La Laguna.

**Organización Mundial de la Salud. (2020).** Manejo de residuos sólidos y salud pública.

# Referencias Bibliográficas

**Banco Interamericano de Desarrollo. (2020).** Gestión integral de residuos sólidos en América Latina.

**Banco Interamericano de Desarrollo. (2022).** Informe Anual del Banco Interamericano de Desarrollo. doi: <http://dx.doi.org/10.18235/0004187>

**Banco Mundial. (2019).** Reciclaje inclusivo en Bogotá. Banco Mundial.

**Congreso de la República de Guatemala. (1986).** Decreto Número 68-86. Guatemala.

**Congreso de la República de Guatemala. (1995).** Decreto Número 3-95. Guatemala.

**Congreso de la República de Guatemala. (1997).** Decreto Número 64-97. Guatemala.

**Congreso de la República de Guatemala. (2002).** Decreto Número 12-2002.

**Instituto de Investigación y Proyección sobre Ambiente Natural y Sociedad. (2022).** Ensayos y Análisis sobre el Agua en Guatemala. Guatemala: Departamento de Ciencias Ambientales.

**Johansson, L. &. (2021).** Economía circular en Estocolmo. Green Solutions.

**Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN). (2018).** Diagnóstico de la Gestión de los Residuos y Desechos Sólidos Comunes en Guatemala. Guatemala.

**Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. (2015).** Acuerdo Gubernativo Número 281-2015. Guatemala.



# EVALUACIÓN de tecnología de NANOBURBUJAS para la REDUCCIÓN de sólidos DISUELTOS y TURBIDEZ,

en una muestra de agua del lago de Amatitlán, Guatemala

**Autor:** Nelson Sebastián Escobar Reyes

## Sobre el autor:

**Nelson Sebastián Escobar Reyes:** *Ingeniero en Gestión Ambiental Local, CUNOC, USAC. MSc. en Ciencia y tecnología de recursos hídricos, CUNOC-USAC.*

## Resumen

El lago de Amatitlán, ubicado en Guatemala, forma parte del grupo de cuerpos de agua que actualmente se encuentran sometidos a un proceso acelerado de contaminación y eutrofización artificial debido al constante ingreso de descargas domésticas, industriales y agrícolas. Esta elevada cantidad de contaminantes provoca la presencia significativa de sólidos disueltos y suspendidos, los cuales consisten en material particulado que permanece en suspensión dentro del cuerpo de agua. Esta condición reduce de manera considerable la transparencia y afecta directamente diversos parámetros físico-químicos esenciales para el equilibrio ecológico del lago. Ante esta problemática, el propósito central de la investigación fue evaluar la capacidad de la tecnología de nanoburbuja de oxígeno para minimizar el material particulado en suspensión, disminuir la turbidez y reducir la turbulencia generada en el recurso hídrico.

La investigación tuvo un enfoque experimental y se desarrolló mediante la toma de una muestra de 33 m<sup>3</sup> de agua caracterizada por una alta carga orgánica y una notable presencia de cianobacterias, principalmente *Microcystis aeruginosa*, especie asociada a floraciones nocivas que afectan la calidad del agua y representan riesgos para la salud. Se aplicó la tecnología de nanoburbuja de oxígeno durante un período de ocho días consecutivos, operando dos horas y 45 minutos por jornada, para un total acumulado de 19 horas de tratamiento. Durante este proceso se obtuvieron seis muestras, siendo la primera utilizada como muestra de control para establecer la línea base de comparación.

Los resultados obtenidos fueron altamente favorables, ya que se logró una reducción del 73.39% en los sólidos disueltos y un 64.05% en los valores de turbidez, demostrando la eficiencia del tratamiento. Finalmente, estos resultados se contrastaron con estándares de calidad correspondientes a lagos oligotróficos de México y Perú, evidenciando el potencial de la tecnología para contribuir a la recuperación ambiental del lago.

**Palabras clave:** Sólidos disueltos, reducción, nanoburbuja, turbidez del agua.

## Introducción

Los efectos de la acelerada contaminación de las aguas del lago Amatitlán son numerosos y visibles. Los altos niveles de sólidos totales en suspensión pueden afectar a la turbidez, aumentar la temperatura del agua y disminuir los niveles de oxígeno disuelto (OD). Esto puede hacer que el agua se caliente rápidamente porque las partículas en suspensión

absorben más calor y agotan el oxígeno, lo que puede afectar negativamente a los organismos acuáticos y a la vida acuática.

El crecimiento urbano e industrial de la ciudad de Guatemala y los municipios de Mixco, Villa Nueva, San Miguel Petapa, Villa Canales, Amatitlán y parte de Santa Catarina Pinula, ha provocado la eutrofización del lago Amatitlán y un alto contenido de sólidos en suspensión, enriqueciendo este cuerpo de agua con contaminantes como fósforo, nitrógeno y

materia orgánica, principalmente. Estas ciudades no cuentan con el tratamiento mínimo de aguas residuales o residuos sólidos domésticos. Por lo tanto, las aguas residuales domésticas aportan el 86% del agua superficial que ingresa al lago, y el agua industrial, que constituye el 14%, se vierte inicialmente a quebradas, ríos, arroyos y al suelo sin ningún tratamiento (Gudiel, 2007).

El principal problema que sufre el lago al recibir vertidos diarios de aguas residuales tiene por tanto tres impactos considerables de diferente naturaleza: la contaminación química, la proliferación de agentes patógenos para el hombre y otras especies, la eutrofización de las aguas (García, 2016), y por ende la acumulación de sólidos en suspensión.

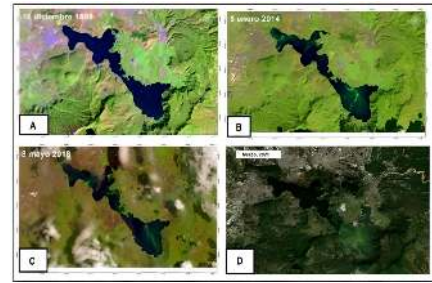
El propósito de la investigación fue evaluar la capacidad de la tecnología de nanoburbuja de oxígeno para reducir porcentajes de los parámetros de sólidos disueltos y de turbiedad, mismos que evidencian la ausencia de tratamiento de agua industrial y residual ordinaria.

# Materiales y Métodos

## Descripción Del Problema:

El lago de Amatitlán debe ser considerado dentro del marco geográfico nacional ya que se encuentra próximo a la ciudad de Guatemala y ejerce gran influencia sobre la cuenca del río María Linda. Este territorio abarca 384 km<sup>2</sup> donde se ubican siete municipios: Guatemala, Mixco, Villa Nueva, Amatitlán, Villa Canales, Santa Catarina Pinula y San Miguel Petapa. En esta zona se encuentra alrededor del 73% de la industria instalada en Guatemala, de la cual no más del 4% cuenta con un sistema de tratamiento de aguas residuales industriales y residuos sólidos, muchos de los cuales son tóxicos, tales como: cromo, plomo, zinc, aceites, y tintes. Además, se identifican 18 beneficios de café y cuatro mataderos que no cuentan con un sistema adecuado para la disposición de residuos. Por su parte, el río Villa Lobos, principal afluente del lago, arrastra alrededor de 500.000 toneladas de sedimentos, lo que significa que anualmente se pierde un promedio de 0,70 metros de profundidad del lago. Las plantas de tratamiento de aguas residuales no funcionan permanentemente, por falta de leyes. Algunas plantas de tratamiento que se construyeron no se encuentran en funcionamiento. Las que se pusieron en funcionamiento se han deteriorado por falta de mantenimiento. Algunas fueron diseñadas para atender a una población menor a la actual. Muy pocas plantas operan a capacidad regular y toda esta agua contaminada es recibida por el lago de Amatitlán, teniendo como efecto una acumulación de sólidos disueltos y por consiguiente una gran cantidad de turbidez, esto ha provocado un acelerado desarrollo de cianobacterias, que se puede observar a continuación (Fig. 1).

Figura 1  
Proceso de eutrofización del lago de Amatitlán, de 1989 al 2021



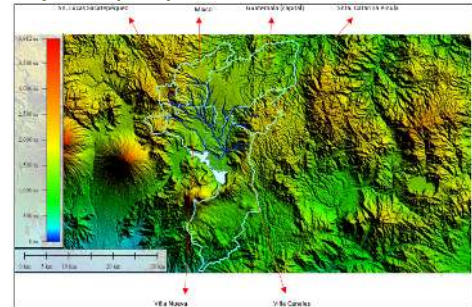
Fuente: Elaboración propia, 2021

Se puede observar que a partir del 2014 en la parte sureste y noroeste del lago comienza una acumulación de materia orgánica contribuyendo al desarrollo de algas, para el año 2018, cuatro años después, la acumulación de algas es más visible en las orillas y parte noreste, finalmente para el año 2021, en la parte sureste es notoria la acumulación de algas, cubriendo más del 30% del total del lago.

## Afluentes De La Contaminación:

El lago de Amatitlán tiene un solo afluente: el río Villalobos. Este a su vez tiene varios afluentes que provienen de San Lucas y México (al Noroeste) y de Puerta Parada y Carretera a El Salvador (Este).

Figura 2  
Ríos y municipios que conectan con el río Villalobos.



Fuente: Elaboración propia, 2021

Todos estos afluentes desembocan en el lago. La imagen superior muestra todos los desechos sólidos que arrastran los ríos de cada municipio, no solo plásticos y latas, sino aguas residuales con gran cantidad de sólidos en suspensión, así mismo como residuos líquidos responsables de que se presenta una gran turbidez en el lago de Amatitlán. Según la Encuesta Nacional de Vida (ENCOVI, 2014), solo el 70% de los hogares urbanos y el 30% de los hogares rurales cuentan con servicio de recolección de residuos sólidos. Y solo el 4% de los municipios tratan su agua. Esto significa que a pesar de que cuentan con una red de drenaje, los municipios vierten aguas residuales crudas y sin tratar al ecosistema.

## Descripción De La Investigación:

La presente investigación se basó en un enfoque experimental, es decir, a escala de laboratorio. Se utilizaron datos estadísticos para observar y determinar la tendencia de comportamiento de cada uno de los parámetros evaluados (Hernandez, 2019). Se utilizó la técnica de recolección de datos con censos y estadísticas de registro continuo de los mismos. En base a los resultados obtenidos se aplicó la fórmula del coeficiente de correlación para cuantificar la

intensidad de la relación lineal entre cada variable con la muestra tomada y procesada en el laboratorio. Finalmente, se elaboró el gráfico de análisis de tendencia, donde se puede apreciar las muestras en comparación con el tiempo y la propensión de cada parámetro analizado.

Para la generación de nanoburbujas se utilizó un equipo de la empresa Kran, modelo K200, con un caudal de 200L/m. Las muestras de agua fueron analizadas en el laboratorio de la entidad gubernamental encargada del manejo y recuperación del lago Amatitlán. Los resultados se compararon con los estándares de calidad latinoamericanos (*México y Perú*) para ríos y lagos.

La evaluación de la tecnología de nanoburbujas se realizó en una piscina de 33 m<sup>3</sup>, la cual se llenó con una muestra de agua con alta carga orgánica que incluía cianobacterias (*Microcystis aeruginosa*).

# Resultados

## Parámetros iniciales de la muestra de agua:

Los resultados obtenidos de la muestra testigo obtenidos se reflejan en la tabla 1.

Tabla 1  
Resultados de la muestra de control

Parámetros	Unidad	Resultado
Sólidos disueltos	mg/L	203
Turbidez	mg/L	306

Fuente: Elaboración propia, 2021

Por otro lado, existen parámetros que influyen y nos indican el nivel de calidad del agua, de los cuales se analizaron tres, pH, oxígeno disuelto y la temperatura, estos parámetros no se estudiaron de manera directa, pero juegan un papel muy importante para que se desarrolle la vida en los lagos oligotróficos.

Tabla 2  
Resultados de la muestra de control, parámetros indicadores e influyentes.

Parámetros	Unidad	Resultado
pH	----	9.48
Oxígeno disuelto	mg/L	10.4
Temperatura	----	27.5

Fuente: Elaboración propia, 2021

## Aplicación De Nanoburbujas De Oxígeno:

El tratamiento tuvo una duración de ocho días operando dos horas y 45 minutos por día, haciendo un total de 19 horas, se tomaron seis muestras para realizar los respectivos análisis de laboratorio, los parámetros a analizar fueron sólidos disueltos y turbidez. Obteniendo los siguientes resultados en la Tabla 3.

Tabla 3  
Control de resultados obtenidos durante el tratamiento con Nanoburbujas de oxígeno

Parámetros	Unid.	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6
Sólidos disueltos	mg/L	203	82	66	82	72	54
Turbidez	mg/L	306	133	122	169	136	110
pH	----	9.48	9.81	9.62	9.33	9.47	8.39
Temperatura	°C	27.5	27	26.8	26.2	26.9	25.5
Oxígeno disuelto	mg/L	10.4	27.2	23.5	27.3	17.14	16.1

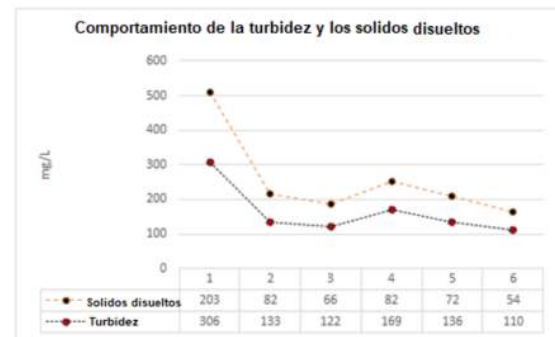
Fuente: Elaboración propia, 2021

La muestra uno no tiene intervención (*muestra de control*). La muestra número dos representa el primer resultado de laboratorio, se obtuvo luego de 24 horas de activación del sistema de tratamiento avanzado con dos horas y 45 minutos de aplicación continua de nanoburbujas de oxígeno, el resto del día que no se aplicó nanoburbuja que son 21 horas con 55 minutos, la nanoburbuja de oxígeno que fue aplicada durante el tiempo de activación del equipo, la nanoburbuja se concentra en realizar el proceso de oxidación y degradación de la muestra analizada. Este mismo proceso se realizó en las demás muestras.

Como se puede apreciar en la tabla anterior, tabla 3, los sólidos disueltos y la turbidez disminuyen de manera significativa. El primer parámetro posee un punto de partida de 203 mg/L, mismo que llega a finalizar a 54 mg/L, perdiendo un total de 149 mg/L en seis días, equivalentes a 14 horas de inyección de nanoburbujas. Por su otra parte, la turbidez pierde un total de 196 mg/L. Esto demuestra que la nanoburbuja disminuye los parámetros analizados.

En relación a los parámetros influyentes e indicativos (*pH, temperatura y oxígeno disuelto*) se tuvo una reducción en el pH de 11.49%, mientras que para la temperatura no se mide este parámetro debido a que el comportamiento de este depende de las condiciones atmosféricas, sin embargo, este parámetro es necesario monitorearlo debido a que, si este aumenta el oxígeno aplicado a partir de nanoburbuja se va volatizando, disminuyendo así la cantidad y disponibilidad de oxígeno.

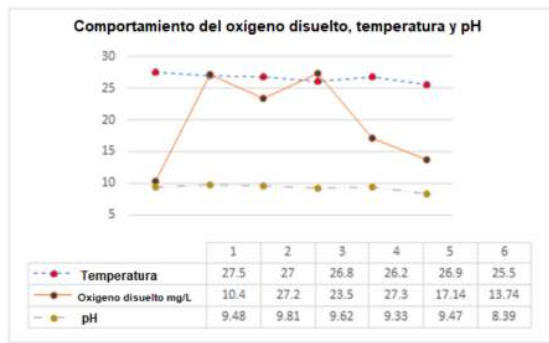
Figura 3  
Comportamiento de los parámetros principales analizados.



Fuente: Elaboración propia, 2021

La turbidez se redujo en un 64,05% y los sólidos disueltos un 73,39%, ambos presentando una reducción superior al 50% con respecto a la muestra control. Se puede ver como la nanoburbuja consiguió reducir este parámetro en tan solo 24 horas. Este fenómeno se produce debido a la capacidad que tiene la nanoburbuja de concentrar una gran cantidad de carga eléctrica en toda su periferia. Cuando la nanoburbuja colapsa, libera radicales libres que hace que todo aquel material adherido a las nanoburbujas se oxide y al mismo tiempo se degraden. Este proceso de adhesión es comúnmente conocido como proceso electrostático y, fundamentalmente sucede esta acción debido a que los sólidos son compuestos inorgánicos, mismos que tiene una capacidad de transmitir corriente eléctrica haciendo que, cuando entran en un cuerpo de agua con nanoburbujas se agrupan para, finalmente ser oxidados o degradados.

Figura 4  
Comportamiento del oxígeno disuelto, temperatura y pH.



Fuente: Elaboración propia, 2021

En relación al oxígeno disuelto inició con 10.4 mg/L con un pico máximo de 27.3 mg/L, con respecto a las muestras donde esta disminuye es porque se aplicó gran cantidad de oxígeno teniendo una gran cantidad tanto en porcentaje y en mg/L de esta bacteria aprovecha la disponibilidad de oxígeno para alimentarse y luego degradarse. Este proceso se puede observar en los picos decrecientes. Finalmente, en las dos últimas muestras hay una descomposición, este es el punto óptimo de aplicación de la nanoburbuja, es decir, si se aplica más oxígeno, las bacterias que ayudan al proceso de descomposición, por otro lado, se puede apreciar la relación con la temperatura, al momento que se encuentra un aumento de temperatura, el oxígeno decae, este principio se debe a la volatilización.

En cuanto al pH, comenzó en 9,48 y terminó en 8,39, en el caso de un líquido como el agua, el pH es una medida de la actividad del potencial de los iones de hidrógeno, es decir, cargas eléctricas positivas, mientras que la nanoburbuja tiene cationes. en su periferia, carga negativa, esto genera un proceso electrostático haciendo que este parámetro disminuya paulatinamente. Manteniendo una alcalinidad que permite la vida acuática.

Finalmente, en relación a la temperatura, es un parámetro que no se puede controlar, pero sí afecta el proceso de reproducción de las cianobacterias (a mayor temperatura, mayor reproducción), por lo que también cobra mucha importancia. Dependiendo de la estabilidad de la nanoburbuja en el agua, a mayor temperatura, la presión interna cae y hace que colapse mucho más rápido; a temperaturas más bajas, la nanoburbuja reside mucho más tiempo.

### Porcentaje De Reducción:

De acuerdo con los resultados obtenidos, se presenta la Tabla 4, donde se refleja el porcentaje de reducción de cada uno de los parámetros analizados.

Tabla 4  
Porcentajes de reducción de cada uno de los parámetros analizados

Parámetros	Unidad	Porcentaje de reducción
Sólidos disueltos	mg/L	73.39 %
Turbiedad	mg/L	64.05 %
pH	---	11.49 %

Fuente: Elaboración propia, 2021

Considerando el tiempo de operación del sistema, la reducción de cada uno de los parámetros analizados es notoria y eficiente. En cuanto a los sólidos en suspensión 73,39% y turbidez se redujo 64,05%, lo que confirma que la tecnología utilizada es efectiva a la hora de reducir sólidos disueltos y reducir la turbidez del agua, teniendo como consecuencia la mejora de la calidad del agua con el incremento de desarrollo flora en el interior del lago a partir de la captación de luz natural para que se pueda generar fotosíntesis, al mismo tiempo mantener el equilibrio en el medio acuático.

### Comparación De Resultados Obtenidos:

Los datos obtenidos en el trabajo de investigación fueron comparados con las normas oficiales mexicanas (*Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales SEMARNAT & Comisión Nacional del Agua CONAGUA, 1996*) y protocolo nacional peruano (*Perú, 2015*), esto debido a que en Guatemala no existe una legislación que estipule los parámetros para la protección de la vida acuática o lagos oligotróficos.

Tabla 5  
Resultados de comparación

Parámetros Referentes			Resultados Obtenidos			
Parámetros	Unid.	Límite Máximo Permissible Promedio Mensual	Parámetros	Unid.	Registro Inicial	Registro Final
Sólidos disueltos	mg/L	40	Sólidos disueltos	mg/L	203	54
pH	---	6.5 - 8.5	pH	---	9.48	8.39

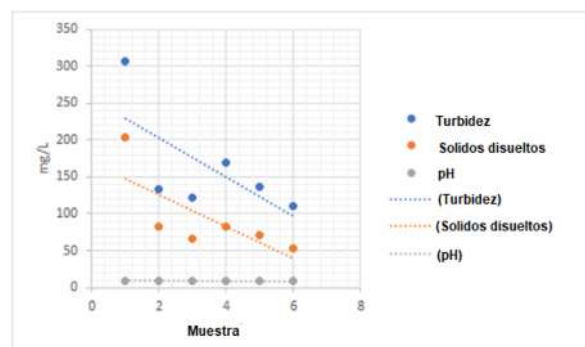
Fuente: Elaboración propia, 2021

Como se puede observar en la tabla anterior, la nanoburbuja consigue reducir la mayoría de los parámetros, tanto los principales como los indicativos; en comparación con el máximo permitido según las normas consultadas. En un parámetros es más evidente que en otro, sin embargo al considerar el tiempo y la cantidad de sólidos disueltos se logra el objetivo de reducir los parámetros analizados, para el caso de la turbidez, no se tiene ningún parámetro referente a nivel Latinoamericano esto debido a que las condiciones del Lago de Amatitlán son particulares, especialmente en su profundidad. Lo que convierte a la tecnología de nanoburbujas en una herramienta plausible para la recuperación de lagos oligotróficos.

### Tendencia De Comportamiento:

La tendencia del comportamiento de los principales parámetros, refleja el siguiente diagrama de dispersión.

Figura 5  
Tendencia de comportamiento de los parámetros evaluados



Fuente: Elaboración propia, 2021

Como se puede apreciar, para sólidos en suspensión como para turbidez la tendencia es a disminuir, estos parámetros están muy relacionados, el coeficiente de correlación para turbidez es  $-0.9868611$ , y para sólidos en suspensión es  $-0.9868611$ . El pH tiene una tendencia insignificante a disminuir, en la tabla de comparación de parámetros este se redujo hasta llegar a un valor aceptable según la referencia, el coeficiente de correlación de este es  $-0.6119881$ .

## Conclusiones

La tecnología de nanoburbujas redujo el parámetro de sólidos disueltos y de la turbidez más del 50% en poco tiempo de funcionamiento. De acuerdo a las normativas de los países latinoamericanos (*México y Perú*) los límites máximos permisibles, promedio mensual, para ríos y lagos oligotróficos son: sólidos disueltos debe ser 40 mg/L y de turbidez no se tiene un referente, los resultados obtenidos fueron 54 mg/L, respectivamente. Esto demuestra la efectividad de la tecnología de nanoburbujas en cuerpos de agua, a pesar del tiempo de operación, si el tratamiento se hubiera prolongado, los resultados hubieran sido mejor, incluso, tenido un resultado final menor de lo que la normativa de referencia solicita. Por otro lado, el pH se redujo a un nivel aceptable en el que se permite la vida acuática.

**Escobar Reyes, N. S. (2020).** Uso de nanoburbuja de oxígeno para reducir contaminantes en lagos: Aplicación en una muestra de agua del lago de Amatitlán. Editorial Académica Española.

**Escobar Reyes, N. S. (2021).** De la teoría a la práctica: Tecnología de nanoburbujas. Eliva Press.

**Escobar Reyes, N. S. (2022).** Aplicación de nanoburbujas como alternativa para la remediación de cuerpos de agua eutrofizados en Guatemala. *Revista de Innovación en Gestión Ambiental*, 5(1), 33–49.

**Escobar Reyes, N. S., & López Hernández, J. (2023).** Análisis comparativo de métodos fisicoquímicos y nanotecnológicos para la recuperación de lagos oligotróficos. *Journal Latinoamericano de Tecnología Ambiental*, 12(4), 112–128.

**Fadus, M. C. (2019).** Nanobubble stability mechanisms and implications for water treatment. *Journal of Nanotechnology*, 8(4), 55–67.

**García, M. (2016).** Eutrofización: Una visión general. *Revista Científica, Tecnológica y Humanista*, 1(1), 47.

**Gudiel, D. B. (2007).** Contaminación y eutrofización del lago de Amatitlán [Tesis de licenciatura]. Universidad de San Carlos de Guatemala.

**Gupta, V. K., & Ali, I. (2019).** Environmental water: Advances in treatment, remediation and recycling. Elsevier.

**He, Z., Ma, L., & Wang, Y. (2018).** Effectiveness of oxygen nanobubbles on reducing turbidity in freshwater bodies. *Environmental Technology*, 39(12), 1572–1580.

**Hernández, C. (2019).** Efecto de micro y nanoburbujas en tratamientos de aguas residuales domésticas: El caso de Pasca, Cundinamarca. Universidad de Cundinamarca.

**Huo, H., Chen, J., & Zhang, L. (2017).** The role of suspended solids in affecting water transparency. *Aquatic Ecology*, 51(4), 543–552.

**Igarashi, K., Nakamura, Y., & Matsumoto, K. (2016).** Application of nanobubble technology to improve dissolved oxygen levels in lakes. *Journal of Water Process Engineering*, 13, 234–240.

**Jones, J. R. (2020).** Limnology and water quality: The fundamentals of lake restoration. *Freshwater Biology*, 65(7), 1201–1210.

## Referencias Bibliográficas

**APHA. (2017).** Standard methods for the examination of water and wastewater (23rd ed.). American Public Health Association.

**Ashton, P. J. (2010).** The dangers of eutrophication: The collapse of aquatic ecosystems. *Environmental Science Journal*, 45(3), 201–215.

**Boudreau, B. P., & Jørgensen, B. B. (2001).** The biogeochemistry of aquatic sediments. Oxford University Press.

**Cheng, X., & Gao, B. (2020).** Nanobubble technology in water treatment: Principles and applications. *Water Research*, 172, 115454.

**Dietrich, A. M., & Burlingame, G. A. (2021).** Critical review of taste and odor problems in drinking water. *Journal of Environmental Sciences*, 99(2), 15–25.

**Escobar Reyes, N. S. (2019).** Evaluación de tecnologías avanzadas para la reducción de turbidez y sólidos disueltos en cuerpos de agua contaminados. *Revista Centroamericana de Recursos Hídricos*, 7(2), 45–58.

**Kadlec, R. H., & Wallace, S. (2009).** Treatment wetlands (2nd ed.). CRC Press.

**Kimura, S., & Sato, T. (2015).** Electrostatic interactions in nanobubble collapse and pollutant degradation. *Colloids and Surfaces A*, 482, 544–552.

**Murphy, J., & Aukerman, R. (2018).** Urban watershed contamination and impacts on lake ecosystems. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190(6), 345–360.

**Paerl, H. W., & Otten, T. G. (2016).** Duelling cyanobacteria: Unravelling harmful algal blooms. *Environmental Microbiology*, 18(2), 316–324.

**Perú, A. N. (2015).** Protocolo nacional para el monitoreo de la calidad de los recursos hídricos superficiales. UT-135807.

**Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) & Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (1996).** Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996.

**Smol, J. P. (2008).** Pollution of lakes and rivers: A paleoenvironmental perspective (2nd ed.). Wiley-Blackwell.

**Stone, M. (2021).** Suspended sediment dynamics and impacts on aquatic systems. *Journal of Hydrology*, 598, 126423.



# El DESARROLLO de las CIUDADES

## intermedias de Guatemala

**Autor:** César Roberto Munguía Maldonado

### Sobre el autor:

César Roberto Munguía Maldonado: *Ingeniero en Administración de Tierras, (CUNOC-USAC, 2016)*

## Resumen

Es de gran relevancia conocer los factores del desarrollo sostenible, por lo que es fundamental comprender los elementos para regular los usos de suelo, considerando como elemento principal el desarrollo sostenible de las personas, el medio ambiente, la movilidad, la economía, entre otros.

Por lo que es importante mencionar que el crecimiento poblacional que se está desarrollando en Guatemala obliga a generar nuevas urbanizaciones, creando una presión significativa sobre los territorios guatemaltecos, principalmente las áreas periféricas de los centros urbanos. Es decir, que la expansión urbana está sobrepasando los límites de las áreas agrícolas y forestales.

Asimismo, es importante considerar que la economía informal está presentando un aumento exponencial, por lo que limita la estabilidad económica a la población, dificultando el acceso a beneficios laborales, como la seguridad social, optar por préstamos bancarios, la pensión, entre otros. (Morales, 2,024) esto limita a las personas la adquisición de una vivienda en áreas con accesibilidad a equipamientos urbanos.

Por lo que es interesante mencionar que las políticas de desarrollo sostenible aún no han sido fortalecidas debido a que es necesario que generen un impacto positivo a la población y prueba de ello es el aumento de las zonas precarias, producto de la pobreza y la falta de acceso a una vivienda digna, esto producto de la migración de las áreas rurales a los centros urbanos.

Por último, el sistema de Transporte público es un eje de desarrollo, ya que permite a que la población tenga el acceso a diferentes equipamientos urbanos para realizar actividades que permiten aumentar las probabilidades de superación educativa, económica y social, debido a esta razón deberá de ser un tema prioritario para los gobiernos. Por otro lado, en el lado social, el transporte público es un ente de cohesión social, ya que permite fomentar la equidad social, debido a la igualdad de oportunidades.

**Palabras clave:** Sostenibilidad, Desarrollo, Urbanismo, Movilidad

## Introducción

Es importante recalcar que cada municipio y cada sector tienen particularidades propias de sí mismas, por lo que este artículo se abordará a nivel general de la república de Guatemala, con el objeto de analizar algunos de los elementos que permiten comprender el crecimiento de las ciudades, asimismo, demostrar algunas de las problemáticas al no poseer una política de Ordenamiento Territorial bien establecida.

Por otro lado, es importante mencionar que la expansión urbana ha limitado la permeabilidad del recurso hídrico, debido al aumento de diferentes desarrollos inmobiliarios, ya que el consumo de dicho recurso aumenta significativamente, considerando que no existe una normativa que regule el consumo y la captación de este recurso, generando insostenibilidad hídrica.

Cabe mencionar que, por la especulación de tierras y la necesidad de vivir cerca de los equipamientos urbanos, así como las dinámicas económicas ha provocado comprar inmuebles en áreas vulnerables a deslizamientos, esto ha

aumentado las zonas de alto riesgo de asentamientos humanos, aumentando de esta manera la cantidad de áreas precarias, principalmente en las zonas conurbadas. En ese sentido, es importante conocer el déficit cuantitativo y cualitativo de vivienda que está presente en Guatemala.

Tal como lo menciona la Nueva agenda Urbana, Según las previsiones, la población urbana mundial prácticamente se duplicará para 2050, lo que hará de la urbanización una de las tendencias más transformadoras en el siglo XXI. Las poblaciones, las actividades económicas, las interacciones sociales y culturales, así como, las repercusiones ambientales y humanitarias, se concentran cada vez más en las ciudades, y ello plantea enormes problemas de sostenibilidad en materia de vivienda, infraestructura, servicios básicos, seguridad alimentaria, salud, educación, empleos decentes, seguridad y recursos naturales, entre otros. (ONU, 2,017)

cifras del INE en 2022 la ubicaban en 71.1%. (Banco Mundial, 2,025), por lo que esto repercute directamente en la estabilidad financiera de las personas, debido a que carecen de prestaciones de ley, préstamos bancarios para optar a una vivienda, o a la ampliación de la misma, y el acceso a seguridad social, etc. Por lo que es un desafío para el desarrollo integral de las familias.

Por otro lado, el acceso a la vivienda en Guatemala presenta desafíos complejos, ya el costo de vivienda es alto, por lo que obliga a la población a ubicarse en áreas vulnerables a deslizamientos, ya que estas tierras son asequibles para la población, sin embargo, esto perjudica a las municipalidades, debido a que no existen los recursos económicos para mitigar, prevenir y la respuesta ante desastres naturales; Considerando que, en Guatemala en el 2023, registró una población de aproximadamente 17.6 millones de personas, con el 53.3% residiendo en zonas urbanas y el resto en zonas rurales, y aproximadamente el 83.5% de la población ubicándose en los niveles socioeconómicos más bajos ganando hasta 815 USD al mes. Este ingreso, apoyado muchas veces por el alto flujo de remesas de guatemaltecos en el exterior, representó el 19.2% del PIB en 2022, siendo una fuente significativa para financiar soluciones habitacionales. (BID, 2,025).

Por otro lado, es importante dimensionar la situación actual sobre la vivienda en Guatemala, ya que, en el 2018, acorde al Censo y datos de la Encuesta Nacional de Empleo e Ingresos (ENEI), el déficit habitacional totalizaba 1,603,364 viviendas de las cuales el 74.9% correspondía a Déficit Cualitativo, mientras que el restante 25.1% correspondía a déficit cuantitativo. Si consideramos la deficiencia en la dimensión de servicios básicos (alumbrado eléctrico, el tipo de agua y disponibilidad de cañería y el servicio higiénico), el déficit habitacional aumenta a 2,237,957 viviendas, correspondiendo al déficit cualitativo el 96%, Esto refleja los desafíos que deben de enfrentar los gobiernos locales y las personas que no tienen un ingreso económico estable, ya que el adquirir una vivienda representa un costo elevado. Por lo que estas áreas están en constante crecimiento, es decir, la pobreza está aumentando, debido a que no existen condiciones reales sobre el establecimiento de viviendas de interés social, que cumplan con los equipamientos urbanos necesarios para el desarrollo integral de las personas.

En relación a la vivienda y ordenamiento territorial es la interdependencia e integración, ya que ambas tienen el objetivo de crear un sistema urbano sostenible, es decir, que puedan aprovechar los recursos naturales y económicos, sin afectar las presentes y futuras generaciones.

Siendo el caso de Guatemala, existe una Política Nacional de Ordenamiento Territorial que dentro de los objetivos específicos es el "Desarrollar instrumentos técnicos para la regulación y control, que permita el uso y ocupación adecuada del territorio. (MAGA, 2,022)"

En ese sentido, la importancia de regular el crecimiento de la mancha urbana para crear una sostenibilidad ambiental, económica y social, que fortalezca la política económica,

# Método

El método cuantitativo que se utilizó en el presente artículo es un diseño no experimental, transeccional descriptivo. Los datos cuantitativos se utilizaron para conocer el comportamiento del de las dinámicas territoriales; en lo concerniente a la metodología cualitativa se realizó por medio de la investigación –acción–, basada en una recopilación bibliográfica ya que esto permitió conocer las características del comportamiento del desarrollo urbano en las ciudades intermedias; de esta manera considerando el punto de vista particular, con el objeto de realizar una concientización hacia el lector sobre las tendencias del crecimiento urbano.

# Resultados

## Crecimiento de las áreas urbanas en Guatemala:

El crecimiento de las áreas urbanas, principalmente en las ciudades intermedias se caracteriza por la migración del campo a la ciudad, debido a la falta de acceso a educación, salud, y fuentes de trabajo.

## Situación Actual:

La población de Guatemala ha crecido aproximadamente un 73% en los últimos 29 años, de 10.3 millones en 1995 a 17.8 millones en 2024, según el Instituto Nacional de Estadística (INE). Este crecimiento ha sido impulsado por una alta tasa de fecundidad y una disminución en la mortalidad, resultando en una población muy joven. (Gobierno de Guatemala, 2,024) por lo que es una oportunidad para promover el empleo y desarrollo de un país, sin embargo, actualmente no existen las condiciones para establecer un país con mano de obra calificada, debido a la falta de acceso a la educación en las áreas rurales, o ciudades intermedias, producto de ello es el alto índice de la economía informal, en el 2024 fue del 47.6% según la OIT, mientras que para Guatemala se estima una tasa cercana al 80% para 2023, según el Banco Mundial, aunque

política de vivienda y otras políticas enfocadas al desarrollo sostenible.

También es importante definir el término Gentrificación vendría a ser el proceso mediante el cual la población original de un sector o barrio, generalmente céntrico y popular, es progresivamente desplazada por otra de un nivel adquisitivo mayor. (Fernández, 2,017).

Es importante mencionar los procesos de gentrificación que se han desarrollado principalmente en las ciudades intermedias, siendo el caso de: Antigua Guatemala, Chimaltenango, Chiquimula, Coatepeque, Cobán, Escuintla, Huehuetenango, Jalapa, Jutiapa, Mazatenango, Puerto Barrios, Quetzaltenango, Retalhuleu, Santa Cruz del Quiche, Zacapa, Santa Lucía Cotzumalguapa en Escuintla. (López, 2,021), por lo que la población han presentado varios desafíos en las nuevas urbanizaciones, debido al alto valor de los inmuebles, a la pérdida de identidad cultural y al no poseer los recursos suficientes para mantener el ritmo de vida que conlleva estas nuevas urbanizaciones tienden a buscar nuevas áreas de vivienda, esto se observa en los cambios de usos de suelo que presentan estos sectores de las ciudades intermedias.

Por otro lado, el crecimiento vehicular en las ciudades intermedias está de manera acelerada, ya que en el 2,021 el Departamento de Tránsito del Ministerio de Gobernación publicó lo siguiente: El parque vehicular en el país ha registrado un incremento en los últimos años, dio a conocer el Observatorio Nacional de Seguridad del Tránsito (ONSET). Según el ONSET, hasta mayo de 2021, se contabilizan 4 millones 289 mil 712 vehículos en toda la república, mientras que a finales de 2020 había 4 millones 096 mil 800, lo que significa un aumento de 192 mil 912, un 4.50% más.

Las motocicletas conforman el 43.09% del total de automotores, con 1 millón 848 mil 623; le siguen los automóviles particulares que suman 832 mil 169, lo que hace el 19.40%; luego están los Pick-ups, 665 mil 271, 15.51%; camionetas, camionetillas y tipo panel, 566 mil 201, 13.20%; camiones, cabezales y transporte de carga, 180 mil 550, 4.21%. (Gobernación, 2,021)

Mientras que, en el 2023, el parque vehicular del país alcanzó los 5.26 millones de unidades, distribuidos de la siguiente manera: el 46.77% son motocicletas, el 16.75% son automóviles, el 28.33% corresponde a pick-ups y camionetas SUV, y solo el 2.3% son buses y microbuses, los cuales podrían utilizarse para el transporte público masivo. (ANADIE, 2,024)

Esto quiere decir que el crecimiento del parque vehicular es exponencial, reflejando la falta de un sistema de transporte público, articulado, seguro, eficiente y sostenible. sin embargo, es importante considerar que entre el año 2,021 y el 2,024 las motocicletas ha aumentado un 3% el crecimiento, esto representa también mayor inseguridad vial, tal como lo menciona el Instituto de Seguridad Social -IGSS- que del 2009 al 2021, se perdieron 568 mil años de vida a causa de accidentes de tránsito, principalmente en motocicleta, detalla un análisis presentado por el Departamento Actuarial y

Estadístico del Instituto Guatemalteco de Seguridad Social (IGSS), (IGSS, 2,025), disminuyendo considerablemente la esperanza de vida de las personas, lo cual no refleja una calidad de vida para la población.

Por último, el sistema de transporte público es esencial en las ciudades ya que como una "parte fundamental" de la ciudad, conectando a las personas de manera asequible y eficiente, y consideraba que las calles activas y los usos mixtos del suelo eran superiores al automóvil (Jacobs, 1,960), en ese sentido permite conectar a las personas con los equipamientos urbanos (escuelas, centros de salud, mercados, etc.) con el fin de promover el desarrollo sostenible, sin embargo, como se mencionó con anterioridad sobre la falta de acceso a una vivienda digna, las personas están obligadas a vivir en las periferias de las ciudades, obligando a las personas a adquirir un vehículo propio para movilizarse y realizar las actividades cotidianas, debido a que el sistema de transporte público no está articulado, prueba de ello es el congestionamiento vehicular en las horas punta en las diferentes áreas de las ciudades intermedias. Esto conlleva asimismo problemas de contaminación ambiental, física y mental de las personas, por lo que no refleja una calidad de vida a la población.

## Conclusiones

Es importante generar indicadores sobre el crecimiento urbano, el sistema actual de transporte público, tendencia de crecimiento poblacional, datos puntuales sobre el déficit cualitativo y cuantitativo de vivienda, ya que la información es escasa y no permite conocer con claridad el estado de desarrollo de la Ciudad de Guatemala.

Derivado de lo anterior, la información recopilada permitirá a los profesionales realizar propuestas basadas a la realidad del territorio, permitiendo a los gobiernos locales tomar decisiones que generen un impacto positivo a la población.

Dentro del comportamiento del crecimiento de la mancha urbana, se visualiza un escenario alarmante, debido a que las políticas de Ordenamiento Territorial no han sido aplicadas a nivel nacional, por otro lado, la política de vivienda no ha sido fortalecida, y no existen programas ni proyectos que fortalezcan el sistema de transporte público en las ciudades intermedias.

Es importante realizar investigaciones sobre las dinámicas territoriales, esto permitirá a los gobiernos locales dimensionar las diferentes problemáticas que existen en las áreas urbanas y rurales, con el fin de realizar planes y programas que permitan mejorar la calidad de vida de la población.

# Referencias Bibliográficas

**ANADIE. (2,024).** Desarrollo e Infraestructura. Movilidad en el área Metropolitana de Guatemala. , 9.

**Banco Mundial. (2,025).** Guatemala Panorama General. Obtenido de <https://www.bancomundial.org/es/country/guatemala>

**BID. (2,025).** Cadena de Valor en la vivienda en Guatemala- BID. Guatemala.

**Colaborativa, G. y. (2,018).** Precariedad Urbana - Rural en el Área Metropolitana de Guatemala. Obtenido de <https://brujula.com.gt/precariedad-urbana-rural-en-el-area-metropolitana-de-guatemala/>

**Fernández, D. (2,017).** Gentrificación: La nueva cruzada de la izquierda . UFM MARKET TRENDS.

**Gobernación, M. d. (Julio de 2,021).** Tránsito PNC. Obtenido de Sigue incrementándose el parque vehicular en Guatemala: <https://transito.gob.gt/sigue-incrementandose-el-parque-vehicular-en-guatemala/>

**Gobierno de Guatemala. (2,024).** Población de Guatemala. Obtenido de <https://mail.vicepresidencia.gob.gt/politica-gobierno-2024-2028/61-poblacion>

**Guatemala., V. d. (2,024).** 6.1 Población . Obtenido de <https://mail.vicepresidencia.gob.gt/politica-gobierno-2024-2028/61-poblacion>

**IGSS. (Julio de 2,025).** Los años de vida perdidos por accidentes de transporte superan el medio millón. Obtenido de Iggs GT: <https://www.igssgt.org/noticias/2025/07/09/los-anos-de-vida-perdidos-por-accidentes-de-transporte-superan-el-medio-millon/>

**Jacobs, J. (1,960).** Muerte y vida de las grandes ciudades estadounidenses . . ¿Erosión de las ciudades o desgaste de los automóviles?

**López, I. R. (Octubre de 2,021).** Zona Libre de Industria y Comercio. Obtenido de POT, ZDEEP y las CIUDADES INTERMEDIAS: <https://zolicguate.com/pot-zdeep-y-las-ciudades-intermedias/>

**MAGA. (2,022).** Política Nacional de Ordenamiento Territorial. Guatemala.

**Morales, D. S. (2,024).** Radiografía de la informalidad laboral en Guatemala.

**OIT. (2,020).** Diagnóstico Sobre la Economía Informal.

**ONU. (2,017).** Nueva Agenda Urbana. Ecuador.



# INVITACIÓN

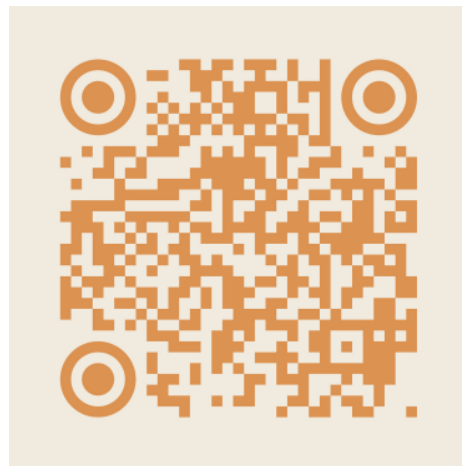
Se invita a todos los egresados de la División de Ciencia y Tecnología del CUNOC, USAC, para que presenten sus ensayos, ponencias, artículos de investigación y sistematización, los cuales deberán cumplir con las normas editoriales y ser inéditos. Del mismo modo se convoca a investigadores invitados de otras Divisiones y otras Universidades o Centros de Investigación, tanto nacionales como internacionales a que envíen sus artículos.

Estos deberán ser enviados al correo: **[gabrielgamboa@cunoc.edu.gt](mailto:gabrielgamboa@cunoc.edu.gt)**

Las normas editoriales y la convocatoria se publicarán en la página web de la División de Ciencia y Tecnología a partir del mes de abril de 2026.

## CODIGO QR

para **ingresar** a la página web



<https://cyt.cunoc.edu.gt/index.php>



# CRÉDITOS

## **Coordinador 3ra. Edición de la revista KITZIA**

Ing. MSc. Gabriel Paolo Gamboa

## **Edición, diagramación, diseño de la revista:**

Licda. Abigail Rodríguez

*\*El contenido de los artículos aquí publicados, son responsabilidad de sus autores.*

# AGRADECIMIENTOS

A los siguientes docentes de la División de Ciencia y Tecnología, por su aporte en la revisión de los artículos científicos de esta edición:

MSc. Esdras Barrios

Inga. Lourdes Pablo

Inga. Barbara Rivas

Licda. Stefanie Barrios

Ing. Leonel Esteban

MSc. Osman Cifuentes

MSc. Alfredo Vásquez

MSc. Javier Zuñiga

MSc. Vicente Chaj

MSc. Mirna Montes

*Sus sugerencias y comentarios para mejorar esta revista son  
bienvenidos en el correo electrónico:  
[gabrielgamboa@cunoc.edu.gt](mailto:gabrielgamboa@cunoc.edu.gt)*



*Kitzia*

CODIGO QR



para **ingresar** a la página web  
de la División del **CyT-CUNOC**

Revista de la División de  
Ciencia y Tecnología-CUNOC