

REVISTA ATHENA LATINHO-AMERICANA

SISTEMA DE INTELIGENCIA TERRITORIAL BIOCULTURAL PARA LA PREDICCIÓN FENOLÓGICA DE LUCIÉRNAGAS (PHOTINUS PALACIOSI) BASADO EN MONITOREO AGROCLIMÁTICO Y VIGILANCIA BIOCULTURAL

Biocultural Territorial Intelligence System for Phenological Prediction of Luciérnagas (Photinus palaciosi) based on Agroclimatic Monitoring and Biocultural Surveillance

Eduardo Sánchez Jiménez¹
Alexandra Bernal Nájera²
Melonie Magdalena Suarez³

Revista Athena Latino-Americana

DOI: 10.69720/3086-5182.2026.000047

ISSN: [3086-5182](https://doi.org/10.69720/3086-5182)

¹Doctor e investigador de la Universidad Politécnica de Atlautla. Es responsable técnico del Proyecto GORRIÓN y fundador del Laboratorio de Inteligencia Territorial y Vigilancia Biocultural (LABIT). Su trabajo se centra en el desarrollo de sistemas de inteligencia territorial, monitoreo agroclimático, vigilancia biocultural, ciencia de datos e inteligencia artificial aplicadas a la conservación de la biodiversidad, la agroecología y los sistemas campesinos de montaña. Ha impulsado el desarrollo de índices predictivos y plataformas de alerta temprana para la gestión territorial y la toma de decisiones basada en evidencia

Email: eduardo_jimenez@upatla.edu.mx

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0552-4658>

²Estudiante de la Universidad Politécnica de Atlautla. Participa en proyectos de monitoreo ambiental, análisis de información agroclimática y vigilancia biocultural, con énfasis en la integración de tecnologías digitales para el seguimiento de la biodiversidad y los ecosistemas de montaña. Sus líneas de interés incluyen el procesamiento de datos ambientales, la investigación aplicada y el fortalecimiento de estrategias de conservación mediante herramientas de inteligencia territorial.

Email: alexandrabernal0306@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/009-0001-0981-4620>

³Estudiante de la Universidad Politécnica de Atlautla, colaboradora del Laboratorio de Inteligencia Territorial y Vigilancia Biocultural (LABIT). Desarrolla actividades relacionadas con el monitoreo de biodiversidad, trabajo de campo, sistematización de información ecológica y apoyo en proyectos de investigación orientados a la conservación de especies y ecosistemas de montaña. Sus intereses se enfocan en la vigilancia biocultural, la participación comunitaria y la aplicación de tecnologías para el monitoreo ambiental.

Email: lenasuarez18@outlook.com

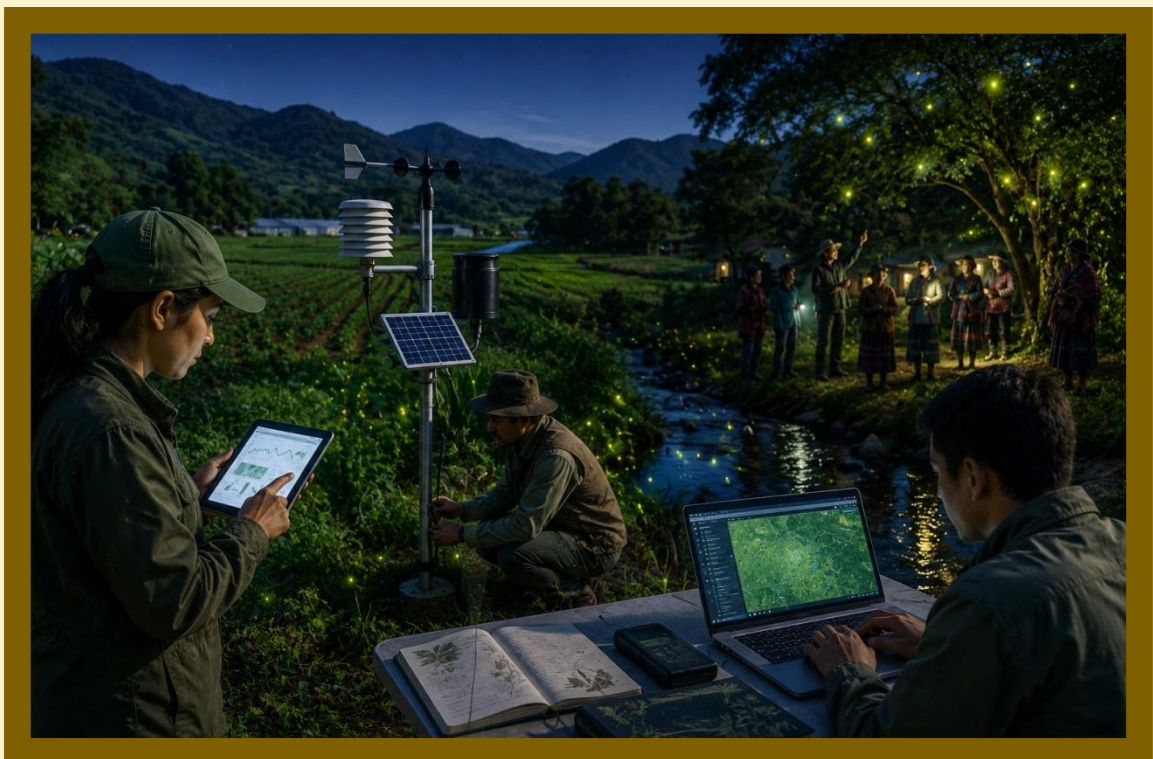
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-8007-6604>



Vol. 1, No. 5 (AGOSTO 2026)

SISTEMA DE INTELIGENCIA TERRITORIAL BIOCULTURAL PARA LA PREDICCIÓN FENOLÓGICA DE LUCIÉRNAGAS (PHOTINUS PALACIOSI) BASADO EN MONITOREO AGROCLIMÁTICO Y VIGILANCIA BIOCULTURAL

Eduardo Sánchez Jiménez, Alexandra Bernal Nájera e Melonie
Magdalena Suarez



PERIÓDICO CIENTÍFICO INDEXADO INTERNACIONALMENTE

ISSN
International Standard Serial Number
3086-5182
www.athena-latino-americana.com

Editora e Revista
Athena Latino-Americana
CPF: 639.619.621-20
Naviraí – Mato Grosso do Sul
Rua: Botocudos, 365 – Centro
CEP: 79950-000

RESUMO

Las luciérnagas (Coleoptera: Lampyridae) constituyen organismos bioindicadores estrechamente vinculados a la integridad ecológica de los ecosistemas forestales y a las condiciones microclimáticas que regulan sus ciclos de vida. Sin embargo, en América Latina existe una limitada disponibilidad de herramientas capaces de integrar monitoreo ambiental, observación fenológica y participación comunitaria para anticipar la ocurrencia de eventos de actividad luminosa. El objetivo de esta investigación fue desarrollar un Sistema de Inteligencia Territorial para la Predicción Fenológica de Luciérnagas basado en monitoreo agroclimático y vigilancia biocultural, utilizando como caso de estudio el Bosque Esmeralda, Amecameca de Juárez, Estado de México. La investigación integró registros meteorológicos generados por la estación Cuatexoxtle 01, observaciones de campo y evidencia fotográfica obtenida durante la temporada 2026. Se analizaron variables asociadas a temperatura, humedad relativa, precipitación acumulada, punto de rocío y velocidad del viento, las cuales fueron incorporadas al Índice Fenológico de Luciérnagas IFL-GORRION v1.0 como componente operativo del sistema. Los resultados preliminares muestran que la actividad luminosa observada presentó una mayor correspondencia con la precipitación acumulada durante los quince días previos al evento que con las condiciones meteorológicas registradas el día del avistamiento. Asimismo, se identificaron condiciones favorables asociadas a acumulados superiores a 50 mm de precipitación, temperaturas medias cercanas a 15.5 °C y velocidades de viento inferiores a 5 km h⁻¹. Se concluye que la integración de monitoreo agroclimático, observación fenológica y vigilancia biocultural constituye una estrategia prometedora para fortalecer la conservación, el monitoreo participativo y la gobernanza territorial de ecosistemas de montaña, proporcionando una base metodológica para el desarrollo de sistemas predictivos aplicados a la biodiversidad.

Palabras clave: luciérnagas; inteligencia territorial; monitoreo agroclimático; vigilancia biocultural; fenología.

ABSTRACT

Fireflies (Coleoptera: Lampyridae) constitute bioindicator organisms closely linked to the ecological integrity of forest ecosystems and the microclimatic conditions that regulate their life cycles. However, in Latin America, there is limited availability of tools capable of integrating environmental monitoring, phenological observation, and community participation to anticipate the occurrence of flashing activity events. The objective of this research was to develop a Territorial Intelligence System for Firefly Phenological Prediction based on agroclimatic monitoring and biocultural surveillance, using Bosque Esmeralda, Amecameca de Juárez, State of Mexico, as a case study. The research integrated meteorological records generated by the Cuatexoxtle 01 station, field observations, and photographic evidence obtained during the 2026 season. Variables associated with temperature, relative humidity, cumulative precipitation, dew point, and wind speed were analyzed and incorporated into the Firefly Phenological Index IFL-GORRION v1.0 as an operational component of the system. Preliminary results show that the observed flashing activity presented a higher correspondence with cumulative precipitation during the fifteen days prior to the event than with the meteorological conditions recorded on the day of the sighting. Likewise, favorable conditions were identified associated with cumulative precipitation exceeding 50 mm, average temperatures close to 15.5 °C, and wind speeds below 5 km h⁻¹. It is concluded that the integration of agroclimatic monitoring, phenological observation, and biocultural surveillance constitutes a promising strategy to strengthen the conservation, participatory monitoring, and territorial governance of mountain ecosystems, providing a methodological basis for the development of predictive systems applied to biodiversity.

Keywords: fireflies; territorial intelligence; agroclimatic monitoring; biocultural surveillance; phenology..

1. INTRODUÇÃO

La biodiversidad mundial enfrenta una de las transformaciones más profundas registradas en la historia reciente. Durante las últimas décadas, múltiples investigaciones han documentado disminuciones significativas en la abundancia, biomasa y distribución geográfica de numerosos grupos de insectos, fenómeno que amenaza procesos ecológicos fundamentales como la polinización, la

regulación biológica, la descomposición de materia orgánica y el mantenimiento de la funcionalidad ecosistémica (Sánchez-Bayo & Wyckhuys, 2019). Este escenario ha impulsado el desarrollo de nuevas estrategias de monitoreo, conservación y gestión adaptativa capaces de generar información oportuna sobre organismos particularmente sensibles a las transformaciones ambientales.

Dentro de estos organismos, las

luciérnagas (Coleoptera: Lampyridae) ocupan una posición singular. Además de constituir uno de los grupos de insectos bioluminiscentes más emblemáticos del planeta, representan indicadores ecológicos estrechamente vinculados con la calidad de los hábitats, la disponibilidad de humedad, la integridad de los ecosistemas forestales y la estabilidad de los procesos ecológicos nocturnos (Lewis et al., 2020). Su presencia, abundancia y comportamiento luminoso reflejan la interacción de múltiples factores ambientales, lo que las convierte en organismos particularmente útiles para evaluar cambios en los sistemas socioecológicos.

El interés científico por las luciérnagas ha evolucionado significativamente durante el último siglo. Los primeros trabajos se concentraron en comprender los mecanismos fisiológicos responsables de la bioluminiscencia. Investigaciones pioneras demostraron que la producción de luz resulta de complejas reacciones bioquímicas que involucran luciferina, luciferasa, oxígeno y energía metabólica, constituyendo uno de los sistemas de conversión energética más eficientes conocidos en la naturaleza (McElroy et al., 1969). Posteriormente, la atención se desplazó hacia la comprensión de los procesos ecológicos y evolutivos asociados a la comunicación luminosa.

Los estudios clásicos de Lloyd (1966, 1983) revelaron que los patrones de destello constituyen sofisticados sistemas de comunicación sexual mediante los cuales machos y hembras reconocen individuos de su misma especie. Más adelante, Lewis y Cratsley (2008) demostraron que la evolución de las señales luminosas está estrechamente relacionada con procesos de selección sexual, elección de pareja y presiones de depredación. Del mismo modo, Carlson y Copeland (1985) documentaron la extraordinaria complejidad de los sistemas de comunicación visual presentes en Lampyridae, mientras que Stanger-Hall y Lloyd (2015) mostraron cómo la divergencia de señales luminosas puede responder a procesos evolutivos de desplazamiento de caracteres y explotación de señales.

Las investigaciones más recientes han profundizado en el estudio de los patrones temporales y espaciales de actividad luminosa. Goh et al. (2022) demostraron que los patrones específicos de destello pueden utilizarse para caracterizar comportamientos nocturnos y diferenciar especies simpátricas.

De manera complementaria, Sarfati et al. (2020, 2022) desarrollaron sistemas de reconstrucción tridimensional mediante cámaras estereoscópicas y tecnologías de visión computacional capaces de analizar dinámicas colectivas, sincronización luminosa y trayectorias de vuelo con niveles de precisión sin precedentes. Estos avances evidencian la creciente convergencia entre ecología, monitoreo automatizado y ciencias computacionales en el estudio de las luciérnagas.

Sin embargo, paralelamente al avance del conocimiento científico, se ha incrementado la preocupación por el deterioro de las poblaciones de luciérnagas a nivel global. Lewis et al. (2020) identificaron tres amenazas principales: pérdida y fragmentación del hábitat, contaminación lumínica y cambio climático. Fallon et al. (2021) documentaron riesgos de extinción para diversas especies de América del Norte, mientras que Fallon et al. (2022) enfatizaron la necesidad de fortalecer estrategias integrales de conservación basadas en monitoreo continuo y participación social.

Entre estas amenazas, la contaminación lumínica destaca como uno de los factores emergentes más relevantes. Longcore y Rich (2004) introdujeron el concepto de contaminación lumínica ecológica para describir los impactos de la iluminación artificial sobre los ecosistemas nocturnos. Posteriormente, Owens y Lewis (2018) demostraron que la luz artificial altera significativamente la comunicación visual de numerosos insectos nocturnos. Investigaciones posteriores confirmaron que la contaminación lumínica puede modificar comportamientos reproductivos, reducir el éxito de apareamiento y afectar la viabilidad poblacional de distintas especies de luciérnagas (Owens et al., 2022; Vaz et al., 2021).

Simultáneamente, la variabilidad climática y el cambio climático introducen nuevas incertidumbres sobre la dinámica poblacional de estos organismos. La temperatura, la humedad, la precipitación y las condiciones microclimáticas influyen directamente sobre el desarrollo larval, la emergencia de adultos y la intensidad de los eventos de actividad luminosa (Sharma et al., 2014). Sin embargo, la relación entre estas variables y la fenología de las luciérnagas continúa siendo insuficientemente comprendida, particularmente en regiones montañosas tropicales y subtropicales donde

convergen múltiples gradientes ambientales.

En América Latina, esta problemática adquiere una dimensión adicional debido a la estrecha relación entre biodiversidad, cultura y territorio. Diversas regiones albergan fenómenos bioluminiscentes que trascienden el interés biológico para convertirse en componentes relevantes del patrimonio biocultural, la educación ambiental y el turismo de naturaleza. En México, los bosques templados asociados al Eje Neovolcánico Transversal constituyen algunos de los escenarios más importantes para la observación de luciérnagas. Sin embargo, la mayoría de las decisiones relacionadas con conservación, manejo y aprovechamiento turístico continúan sustentándose en observaciones empíricas y conocimientos fragmentados, sin sistemas robustos de monitoreo y predicción.

Esta situación revela una limitación más profunda: la persistencia de enfoques reduccionistas que analizan los fenómenos ecológicos de manera aislada, sin considerar las complejas interacciones entre factores ambientales, tecnológicos, sociales y culturales. Desde la perspectiva de los sistemas complejos, los procesos ecológicos no pueden comprenderse adecuadamente mediante la simple suma de variables independientes, sino que emergen de redes dinámicas de interacciones entre múltiples componentes (García, 2006). En consecuencia, el estudio de la actividad luminosa de las luciérnagas requiere enfoques capaces de integrar simultáneamente dimensiones ecológicas, climáticas, territoriales y socioculturales.

En este contexto cobra relevancia el Paradigma Emergente de Inteligencia Territorial Biocultural (PEITB), propuesto recientemente como un marco conceptual orientado a comprender y gestionar sistemas sociotécnicos territoriales complejos mediante procesos de co-producción de conocimiento, agencia biocultural y apropiación social del conocimiento (Sánchez Jiménez, 2026a). Este paradigma plantea que los territorios constituyen configuraciones relacionales donde interactúan actores humanos, infraestructuras tecnológicas, componentes ecológicos, conocimientos locales y procesos institucionales, generando dinámicas emergentes que no pueden explicarse desde perspectivas sectoriales.

Desde esta visión, la inteligencia territorial deja de concebirse como un simple proceso de recopilación de datos para

transformarse en una capacidad colectiva de observación, interpretación y acción sobre los sistemas socioecológicos. La vigilancia biocultural, entendida como la articulación entre monitoreo ambiental, conocimiento local y participación comunitaria, adquiere entonces un papel estratégico en la generación de información territorialmente contextualizada (Danielsen et al., 2022; Sánchez Jiménez, 2026a).

Paralelamente, el desarrollo reciente de redes agroclimáticas comunitarias ha demostrado el potencial de integrar monitoreo ambiental automatizado con sistemas de alerta temprana y toma de decisiones territoriales. Experiencias previas desarrolladas en el Estado de México evidencian que las estaciones meteorológicas pueden utilizarse para construir modelos predictivos aplicados a fenómenos socioecológicos complejos, fortaleciendo la capacidad territorial para anticipar riesgos y oportunidades ambientales (Sánchez Jiménez, 2026b).

Sobre estas bases conceptuales surge el proyecto GORRION (Gestión Operativa de Riesgos y Observación para la Resiliencia, Investigación e Inteligencia de la Naturaleza), impulsado desde el Laboratorio de Inteligencia Territorial y Vigilancia Biocultural (LABIT) de la Universidad Politécnica de Atlautla. Este proyecto busca integrar monitoreo agroclimático, observación participativa, análisis territorial e inteligencia ecológica para construir sistemas de observación orientados a la gestión adaptativa de fenómenos socioecológicos en regiones montañosas.

Como una aplicación específica de este enfoque se propone el Sistema de Inteligencia Territorial para la Predicción Fenológica de Luciérnagas (SIT-Luciérnagas), concebido como una plataforma de integración entre monitoreo agroclimático, vigilancia biocultural y análisis fenológico. Su componente operativo principal corresponde al Índice Fenológico de Luciérnagas IFL-GORRION v1.0, diseñado para estimar la probabilidad e intensidad de actividad luminosa a partir de variables ambientales registradas por estaciones meteorológicas, observaciones de campo y evidencia fotográfica generada por actores territoriales.

El presente trabajo tiene como objetivo desarrollar y evaluar preliminarmente el SIT-Luciérnagas utilizando información generada por la estación Cuatexoxtle 01, ubicada en Bosque Esmeralda, Amecameca de Juárez, Estado de México. Se plantea la

hipótesis de que la integración de variables agroclimáticas, observaciones fenológicas y vigilancia biocultural permite construir un sistema de inteligencia territorial capaz de anticipar condiciones favorables para la actividad luminosa de las luciérnagas, contribuyendo simultáneamente a la conservación biocultural, la gobernanza territorial y la generación de conocimiento socioecológico en Sistemas Campesinos de Montaña Templados Subhúmedos.

Te propongo una metodología con estructura compatible con revistas como *Ecological Indicators*, *Ecological Informatics*, *Environmental Monitoring and Assessment* o *Ecology and Society*. La redacción integra el PEITB, el enfoque de sistemas complejos, el monitoreo agroclimático y la vigilancia biocultural como elementos metodológicos centrales del SIT-Luciérnagas.

2. METODOLOGÍA

2.1 Enfoque epistemológico y diseño de investigación

La investigación se desarrolló bajo el marco conceptual del Paradigma Emergente de Inteligencia Territorial Biocultural (PEITB), el cual concibe los territorios como sistemas sociotécnicos complejos donde interactúan componentes ecológicos, tecnológicos, sociales, culturales e institucionales mediante relaciones dinámicas de co-producción de conocimiento (Sánchez Jiménez, 2026a). Desde esta perspectiva, la actividad luminosa de las luciérnagas no se interpreta exclusivamente como un fenómeno biológico, sino como una manifestación emergente de procesos socioecológicos que vinculan condiciones ambientales, estructura ecosistémica, prácticas territoriales y capacidades de observación comunitaria.

Metodológicamente, el estudio adoptó un diseño observacional, exploratorio y correlacional orientado al desarrollo de un sistema de inteligencia territorial para la predicción fenológica de luciérnagas. La investigación integró información agroclimática obtenida mediante sensores automáticos, observaciones fenológicas de campo, registros fotográficos y procesos de vigilancia biocultural, buscando generar una primera aproximación operativa para la construcción del Sistema de Inteligencia Territorial para la Predicción Fenológica de Luciérnagas (SIT-Luciérnagas).

El diseño se fundamentó en los principios de los sistemas complejos desarrollados por García (2006), según los

cuales los fenómenos territoriales emergen de la interacción no lineal entre múltiples componentes y escalas de análisis. En consecuencia, la metodología privilegió la integración de diversas fuentes de información antes que el análisis aislado de variables individuales. **2.2 Área de estudio**

La investigación se desarrolló en Bosque Esmeralda, localizado en el municipio de Amecameca de Juárez, Estado de México, dentro de la región biocultural asociada al corredor Izta-Popo. Esta zona forma parte de los ecosistemas templados subhúmedos del Eje Neovolcánico Transversal y se caracteriza por la presencia de bosques de oyamel (*Abies religiosa*), pino (*Pinus spp.*) y encino (*Quercus spp.*), así como por una marcada estacionalidad climática.

El área presenta una elevada importancia ecológica debido a su ubicación dentro de una región de transición altitudinal donde convergen procesos hidrológicos, forestales, agroecológicos y de conservación biológica. Asimismo, constituye uno de los territorios donde se han reportado eventos recurrentes de actividad luminosa de luciérnagas durante el establecimiento de la temporada de lluvias.

Como unidad principal de monitoreo se utilizó la estación meteorológica Cuatexotle 01, perteneciente a la red agroclimática GORRION-LABIT. Esta estación forma parte de una infraestructura territorial orientada a la generación de información ambiental para investigación, monitoreo comunitario y vigilancia biocultural.

2.3 Arquitectura metodológica del SIT-Luciérnagas

El Sistema de Inteligencia Territorial para la Predicción Fenológica de Luciérnagas fue estructurado mediante cuatro subsistemas interdependientes: **Subsistema agroclimático**, responsable de la adquisición continua de información meteorológica; **Subsistema fenológico**, orientado al registro de eventos de actividad luminosa; **Subsistema de vigilancia biocultural**, encargado de integrar observaciones territoriales y evidencia visual, y **Subsistema de inteligencia territorial**, dedicado a la generación de indicadores sintéticos y productos para la toma de decisiones. La integración de estos componentes permitió construir una plataforma inicial de observación socioecológica basada en los principios de co-producción de conocimiento planteados por el

PEITB (Sánchez Jiménez, 2026a). El SIT-Luciérnagas integra componentes de inteligencia territorial, monitoreo agroclimático y vigilancia biocultural

(Cuadro1).

Cuadro 1. Componentes conceptuales del Sistema de Inteligencia Territorial para la Predicción Fenológica de Luciérnagas (SIT-Luciérnagas)

Componente	Definición operacional	Función en el estudio
Inteligencia Territorial Biocultural Vigilancia	Integración de información ecológica, tecnológica y social	Interpretación territorial
Biocultural	Observación sistemática del territorio	Registro fenológico
Monitoreo Agroclimático	Captura automatizada de variables ambientales	Fuente de datos
IFL-GORRION v1.0	Índice Fenológico de Luciérnagas	Estimación de favorabilidad
Sistema Sociotécnico Territorial	Interacción entre actores, tecnología y ecosistemas	Marco analítico

Fuente: elaboración propia, con base en trabajo de campo 2026.

2.4 Monitoreo agroclimático

La información climática fue obtenida mediante la estación Cuatepoxtle 01, equipada con sensores automáticos para el

registro continuo de variables atmosféricas. La precipitación antecedente fue incorporada como variable principal del modelo (Tabla 1).

Tabla 1. Variables agroclimáticas utilizadas para la construcción del IFL-GORRION v1.0

Variable	Unidad	Fuente	Escala temporal	Función
<i>media</i> Temperatura	°C	Cuatepoxtle 01	Horaria	Regulación fisiológica
<i>relativa</i> Humedad	%	Cuatepoxtle 01	Horaria	Disponibilidad hídrica
<i>acumulada</i> Precipitación	mm	Cuatepoxtle 01	Diaria	Variable principal
<i>viento</i> Velocidad del viento	km h ⁻¹	Cuatepoxtle 01	Horaria	Estabilidad atmosférica
Punto de rocío	°C	Cuatepoxtle 01	Horaria	Condensación ambiental

Fuente: elaboración propia, con base en trabajo de campo 2026.

Estas variables fueron seleccionadas con base en antecedentes que documentan la influencia de la temperatura, humedad y precipitación sobre el comportamiento y fenología de las luciérnagas (Lewis et al., 2020; Sharma et al., 2014). Los datos fueron almacenados y procesados para generar indicadores diarios, semanales y quincenales. Particular atención se otorgó a la precipitación acumulada antecedente debido a la importancia de la humedad del suelo y la hojarasca durante las etapas larvales y reproductivas de los Lampyridae (Owens & Lewis, 2022).

1.5 Monitoreo fenológico

La actividad bioluminosa fue

registrada mediante observaciones directas realizadas durante la temporada inicial de emergencia correspondiente al año 2026. Para cada evento se documentó: fecha, hora de inicio, hora de máxima actividad, hora de finalización, intensidad observada, condiciones ambientales percibidas y evidencia fotográfica. Las observaciones fueron realizadas principalmente durante el periodo crepuscular y las primeras horas de la noche, coincidiendo con los horarios de mayor actividad reportados para diversas especies de luciérnagas (Lloyd, 1983; Lewis & Cratsley, 2008). La intensidad observacional fue

clasificada mediante una escala ordinal de cinco categorías: Muy baja, Baja, Moderada, Alta, Muy alta. Este procedimiento permitió generar una medida cualitativa estandarizada para contrastar las condiciones ambientales observadas.

2.6 Vigilancia biocultural

La vigilancia biocultural constituyó un componente central del sistema, permitiendo integrar procesos de observación comunitaria y generación participativa de información. De acuerdo con Danielsen et al. (2022), los sistemas de monitoreo comunitario fortalecen significativamente la resolución espacial y temporal de los programas de observación ambiental. Por ello, las observaciones de campo fueron complementadas mediante registros fotográficos, narrativas locales y reportes de observadores vinculados al territorio.

Las fotografías fueron consideradas como evidencia de presencia, intensidad relativa y distribución espacial del fenómeno. Aunque no fueron utilizadas para estimar abundancias absolutas, sí permitieron documentar patrones consistentes de actividad luminosa. Este enfoque responde a los principios de apropiación social del conocimiento y agencia biocultural propuestos por el PEITB, donde la producción de información constituye un proceso compartido entre actores humanos, tecnologías de observación y componentes ecológicos (Sánchez Jiménez, 2026a).

2.7 Construcción del Índice Fenológico de Luciérnagas (IFL-GORRION v1.0)

El IFL-GORRION v1.0 fue concebido como el módulo operativo central del SIT-Luciérnagas. Su formulación inicial se basó en tres variables consideradas ecológicamente relevantes:

- Humedad antecedente (HA).
- Temperatura media antecedente (T).
- Viento promedio (V).

La humedad antecedente fue estimada mediante la precipitación acumulada durante los quince días previos a cada evento de observación. La formulación utilizada fue:

$$IFL = 0.50(HA) + 0.30(T) + 0.20(V)$$

Los coeficientes fueron definidos mediante ponderación experta sustentada en evidencia ecológica y observaciones preliminares del sitio piloto. Posteriormente, los resultados fueron normalizados en una escala de 0 a 100 puntos. La clasificación propuesta fue:

- 0–40: Muy baja probabilidad.
- 41–60: Baja probabilidad.
- 61–75: Favorable.
- 76–90: Muy favorable.
- 91–100: Explosión bioluminiscente.

Esta clasificación busca traducir información agroclimática compleja en indicadores comprensibles para investigadores, comunidades locales y gestores territoriales.

2.8 Generación de inteligencia territorial

Los datos obtenidos fueron integrados mediante procedimientos de análisis descriptivo y síntesis territorial. Siguiendo la lógica metodológica desarrollada en los sistemas predictivos agroclimáticos propuestos por Sánchez Jiménez (2026b), el objetivo no consistió únicamente en describir variables ambientales, sino en generar información útil para anticipar condiciones favorables de ocurrencia del fenómeno. La inteligencia territorial fue entendida como la capacidad del sistema para transformar datos dispersos en conocimiento operativo aplicable a procesos de monitoreo, conservación y toma de decisiones. Los productos generados incluyeron:

- Indicadores fenológicos.
- Índices sintéticos.
- Boletines de monitoreo.
- Visualizaciones territoriales.
- Reportes de actividad luminosa.

2.9 Validación preliminar y consideraciones éticas

La validación inicial se realizó utilizando el evento de actividad luminosa documentado el 29 de mayo de 2026 en Bosque Esmeralda. Se contrastaron las condiciones agroclimáticas registradas durante el evento y los quince días previos con la intensidad observada y la evidencia fotográfica disponible. Este procedimiento permitió evaluar la coherencia ecológica del índice y verificar su capacidad para representar condiciones favorables de actividad luminosa. Debido al carácter exploratorio de la investigación, la validación debe considerarse preliminar. Futuras fases del proyecto incorporarán análisis estadísticos multianuales, aprendizaje automático, monitoreo automatizado mediante visión computacional y ampliación de la red territorial de observación, siguiendo las recomendaciones propuestas por Tuia et al. (2022), Besson et al. (2022) y Sarfati et al. (2023).

Todas las observaciones fueron realizadas bajo criterios de mínima perturbación ambiental. No se efectuaron capturas, manipulación ni extracción de organismos. Asimismo, las actividades de observación procuraron minimizar el uso de iluminación artificial para evitar alteraciones en los comportamientos naturales de las luciérnagas, conforme a las recomendaciones de conservación propuestas por Lewis et al. (2020) y Owens et al. (2022). La investigación se desarrolló bajo principios de vigilancia biocultural, promoviendo la participación local, la apropiación social del conocimiento y el fortalecimiento de capacidades territoriales para la conservación de la biodiversidad.

Antes de presentar la sección de resultados, una observación crítica: con los datos actualmente disponibles (evento documentado del 29 de mayo de 2026, serie agroclimática previa de 15 días, registros de la estación Cuatepoxtle 01 y evidencia fotográfica), todavía no es posible realizar inferencias estadísticas robustas propias de una validación completa. Por ello, los resultados deben redactarse como una evaluación preliminar del SIT-Luciérnagas y del IFL-GORRION v1.0, enfatizando patrones observados, coherencia ecológica y funcionamiento del sistema de inteligencia territorial.

3. RESULTADOS

3.1 Caracterización del Sistema de Inteligencia Territorial para la Predicción Fenológica de Luciérnagas

La implementación del Sistema de Inteligencia Territorial para la Predicción Fenológica de Luciérnagas (SIT-Luciérnagas) permitió integrar información agroclimática, observaciones fenológicas y evidencia biocultural generada en Bosque Esmeralda, Amecameca de Juárez, Estado de México. Esta integración constituyó el primer ejercicio operativo desarrollado dentro de la infraestructura de monitoreo territorial impulsada por el Laboratorio de Inteligencia Territorial y Vigilancia Biocultural (LABIT) mediante la red agroclimática GORRION.

A diferencia de los enfoques tradicionales centrados exclusivamente en el monitoreo biológico, el SIT-Luciérnagas funcionó como un sistema sociotécnico territorial capaz de articular múltiples fuentes de información. Durante la fase inicial de implementación se logró vincular la estación meteorológica Cuatepoxtle 01, observaciones

de campo, registros fotográficos y procedimientos de interpretación territorial orientados a la construcción del Índice Fenológico de Luciérnagas IFL-GORRION v1.0. Desde la perspectiva del Paradigma Emergente de Inteligencia Territorial Biocultural (PEITB), esta configuración permitió establecer una infraestructura básica de observación donde sensores ambientales, observadores humanos y procesos de interpretación colectiva participaron en la generación de conocimiento territorial aplicado (Sánchez Jiménez, 2026a).

3.2 Comportamiento agroclimático previo al evento fenológico

Los registros obtenidos por la estación Cuatepoxtle 01 permitieron caracterizar las condiciones ambientales presentes durante el periodo comprendido entre el 15 y el 29 de mayo de 2026, considerado como ventana temporal antecedente para el análisis fenológico. Durante dicho periodo se registró una temperatura máxima de 27.8 °C y una mínima de 5.5 °C, con una temperatura media de 15.5 °C. La humedad relativa alcanzó valores máximos de 87 % y mínimos de 19 %, presentando una media de 65.1 %. El punto de rocío mostró una media de 8.4 °C, mientras que la velocidad media del viento se mantuvo cercana a 4.4 km h⁻¹. Uno de los resultados más relevantes correspondió a la precipitación acumulada antecedente. Los registros indicaron una acumulación total de 51.05 mm durante los quince días previos al evento de observación. Este valor constituye un indicador de recarga hídrica significativa para los horizontes superficiales del suelo y la capa de hojarasca característica de los bosques templados de montaña.

Desde una perspectiva ecológica, estas condiciones sugieren un escenario favorable para el mantenimiento de microhábitats húmedos asociados a las fases larvales de Lampyridae. Diversos estudios han documentado que la disponibilidad de humedad constituye un factor crítico para la supervivencia y desarrollo de numerosos organismos asociados a ecosistemas forestales, incluyendo distintas especies de luciérnagas (Lewis et al., 2020; Owens & Lewis, 2022). La combinación de precipitación acumulada, temperaturas moderadas y velocidades bajas de viento configuró un contexto ambiental potencialmente favorable para la emergencia y actividad reproductiva de adultos.

3.3 Caracterización ambiental del evento del 29 de mayo de 2026

El principal evento utilizado para la validación preliminar del sistema correspondió al avistamiento documentado el 29 de mayo de 2026 entre las 19:30 y las 20:30 horas. Durante dicha jornada la estación Cuatepoxtle 01 registró una temperatura máxima de 25.5 °C, una mínima de 5.5 °C y una temperatura media cercana a 12 °C. La humedad relativa presentó valores comprendidos entre 24 % y 79 %, con una media de 58.5 %. No se registró precipitación durante el día del evento. La velocidad máxima del viento alcanzó 15.4 km h⁻¹, mientras que la velocidad media permaneció cercana a 4.9 km h⁻¹. La presión atmosférica osciló entre 1012.53 y 1014.22 hPa. Un aspecto particularmente relevante fue la ausencia de precipitación durante la jornada de observación. Este resultado permitió identificar una diferencia importante entre las condiciones ambientales inmediatas y las condiciones acumuladas durante el periodo antecedente.

Mientras el día del avistamiento presentó condiciones relativamente moderadas y ausencia de lluvia, las dos semanas previas habían acumulado más de 50 mm de precipitación. Esta situación sugiere que la actividad luminosa observada estuvo más estrechamente relacionada con la humedad almacenada en el ecosistema que con la precipitación instantánea registrada durante el evento.

3.4 Evidencia fenológica obtenida mediante observación directa

Las observaciones realizadas durante el periodo de monitoreo permitieron documentar uno de los eventos de actividad luminosa más intensos registrados en la fase inicial del proyecto. La actividad comenzó aproximadamente a las 19:30 horas, coincidiendo con el establecimiento de condiciones crepusculares avanzadas. La máxima intensidad observacional se registró entre las 19:50 y las 20:20 horas, observándose una elevada concentración de señales luminosas distribuidas en diferentes estratos del bosque.

La duración total del evento fue cercana a una hora, disminuyendo progresivamente después de las 20:30 horas. La clasificación cualitativa utilizada en el monitoreo permitió ubicar este evento dentro de la categoría de intensidad muy alta. La abundancia aparente de señales luminosas

observadas simultáneamente superó ampliamente los niveles asociados a eventos aislados o de baja actividad. Estos resultados coinciden con descripciones realizadas por Lloyd (1983) y Lewis y Cratsley (2008), quienes señalan que numerosas especies presentan ventanas temporales relativamente estrechas de máxima actividad asociadas a comportamientos reproductivos y de comunicación luminosa.

3.5 Evidencia fotográfica y validación visual

La documentación fotográfica constituyó una de las principales fuentes de validación del sistema. Las imágenes obtenidas muestran una elevada densidad de señales bioluminiscentes distribuidas a lo largo de senderos forestales y áreas con abundante cobertura vegetal. Los registros evidencian una actividad luminosa generalizada, observándose numerosos patrones de destello simultáneos en diferentes sectores del bosque.

Si bien las fotografías fueron obtenidas mediante exposiciones prolongadas y por tanto no permiten estimar abundancias absolutas de individuos, sí proporcionan evidencia consistente sobre la intensidad relativa del fenómeno. Asimismo, las imágenes permitieron identificar una estrecha asociación entre los eventos luminosos y áreas caracterizadas por elevada cobertura forestal, presencia de hojarasca y condiciones de humedad aparentemente favorables. Desde una perspectiva metodológica, la incorporación de registros visuales fortaleció los procesos de vigilancia biocultural al permitir documentar el fenómeno de manera accesible para observadores, comunidades y gestores territoriales.

3.6 Desempeño del Índice Fenológico de Luciérnagas IFL-GORRION v1.0

La aplicación del IFL-GORRION v1.0 permitió sintetizar la información agroclimática disponible mediante una escala estandarizada de favorabilidad fenológica. La evaluación de la humedad antecedente asignó valores elevados debido a la acumulación superior a 50 mm registrada durante los quince días previos al evento. De manera complementaria, la temperatura media antecedente de 15.5 °C se ubicó dentro del rango considerado óptimo para esta fase preliminar del modelo. La velocidad media del viento inferior a 5 km h⁻¹ también fue

clasificada como favorable debido a las condiciones relativamente estables observadas durante el periodo analizado.

La integración de estas variables generó un valor aproximado de 93 puntos en la escala del índice. Este resultado ubicó al evento dentro de la categoría denominada “Explosión Bioluminiscente”, correspondiente al nivel más alto de favorabilidad ambiental definido para la versión inicial del modelo. La concordancia observada entre la clasificación generada por el índice y la intensidad registrada mediante observación directa constituye uno de los hallazgos más relevantes de la investigación. Aunque esta evidencia no representa una validación estadística concluyente, sí demuestra que la estructura conceptual del índice posee coherencia ecológica y capacidad inicial para representar condiciones favorables de actividad luminosa. En resumen el evento utilizado para la validación preliminar del índice presentó un valor de 93 puntos en la escala IFL-GORRION (Tabla 2).

Tabla 2. Caracterización agroclimática y fenológica del evento de alta actividad luminosa registrado el 29 de mayo de 2026

Indicador	Valor
<i>Fecha</i>	29 mayo 2026
<i>Horario de observación</i>	19:30–20:30
<i>Máxima actividad</i>	19:50–20:20
<i>Precipitación antecedente (15 días)</i>	51.05 mm
<i>Temperatura media antecedente</i>	15.5 °C
<i>Velocidad media del viento</i>	4.4 km h ⁻¹
<i>Categoría observada</i>	Muy alta
<i>IFL-GORRION v1.0</i>	93

Fuente: elaboración, propia con base en trabajo de campo 2026.

3.7 Generación de inteligencia territorial

Uno de los resultados más significativos del estudio fue la transformación de datos ambientales dispersos en información territorialmente útil. Tradicionalmente, los registros

meteorológicos permanecen aislados de los procesos de monitoreo biológico y toma de decisiones territoriales. En contraste, el SIT-Luciérnagas permitió integrar variables climáticas, observaciones fenológicas y evidencia visual dentro de un sistema común de interpretación. Esta integración facilitó la construcción de indicadores operativos capaces de responder preguntas relevantes para la gestión territorial, tales como:

- ¿Cuándo podrían ocurrir eventos de alta actividad luminosa?
- ¿Qué condiciones ambientales parecen favorecer el fenómeno?
- ¿Qué variables presentan mayor potencial predictivo?
- ¿Cómo puede fortalecerse la observación comunitaria?

Desde la perspectiva del PEITB, estos resultados reflejan la emergencia de capacidades territoriales de observación y análisis asociadas a procesos de co-producción de conocimiento (Sánchez Jiménez, 2026a).

3.8 Configuración sociotécnica observada

El funcionamiento del sistema evidenció la importancia de la interacción entre componentes tecnológicos, ecológicos y sociales. La estación meteorológica proporcionó información ambiental continua; los observadores generaron registros fenológicos; las fotografías documentaron evidencia espacial del fenómeno; y los procesos de análisis permitieron traducir los datos en indicadores interpretables. Esta configuración coincide con la noción de sistema sociotécnico territorial planteada por el PEITB, donde la producción de conocimiento emerge de redes de interacción entre actores humanos, infraestructuras tecnológicas y componentes ecológicos (Sánchez Jiménez, 2026a). La observación de las luciérnagas dejó de constituir únicamente una actividad naturalista para convertirse en un proceso de generación de inteligencia territorial.

3.9 Potencial para escalamiento del sistema

Los resultados obtenidos permiten identificar un importante potencial de crecimiento para el SIT-Luciérnagas. La estructura desarrollada durante esta fase inicial puede ampliarse mediante la incorporación de nuevas estaciones agroclimáticas, observadores comunitarios, sensores ambientales y herramientas de análisis

automatizado. Asimismo, la integración futura de variables como fase lunar, cobertura nubosa, humedad del suelo, contaminación lumínica y visión computacional permitirá incrementar la capacidad predictiva del sistema.

Las propuestas desarrolladas por Sarfati et al. (2020, 2022, 2023), Tuia et al. (2022) y Besson et al. (2022) sugieren que la combinación de monitoreo automatizado y aprendizaje automático podría constituir una etapa posterior para el fortalecimiento del SIT-Luciérnagas. Estos hallazgos constituyen la primera evidencia empírica para el desarrollo de un sistema de predicción fenológica de luciérnagas basado en monitoreo agroclimático y vigilancia biocultural en los Sistemas Campesinos de Montaña Templados Subhúmedos del centro de México. A continuación presento una discusión orientada a una revista Q2, donde los resultados se interpretan no solamente desde la ecología de las luciérnagas, sino desde la perspectiva de la inteligencia territorial biocultural, los sistemas complejos y la vigilancia socioecológica.

4. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos durante la fase inicial de implementación del Sistema de Inteligencia Territorial para la Predicción Fenológica de Luciérnagas (SIT-Luciérnagas) permiten avanzar en la comprensión de las relaciones existentes entre condiciones agroclimáticas, actividad luminosa de luciérnagas y procesos de observación territorial. Más allá de la construcción de un índice fenológico, la investigación aporta evidencia preliminar sobre la viabilidad de integrar monitoreo ambiental automatizado, vigilancia biocultural y generación de inteligencia territorial para el análisis de fenómenos socioecológicos complejos en ecosistemas de montaña.

Uno de los hallazgos más relevantes corresponde a la aparente relación entre la actividad luminosa observada y la precipitación acumulada durante los quince días previos al evento. Tradicionalmente, las observaciones de campo realizadas por visitantes, prestadores de servicios ecoturísticos e incluso investigadores suelen asociar la presencia de luciérnagas con las condiciones meteorológicas observadas durante la misma noche de avistamiento. Sin embargo, los resultados obtenidos sugieren que esta interpretación puede resultar insuficiente para explicar la dinámica fenológica del fenómeno.

El evento documentado el 29 de mayo de 2026 ocurrió en ausencia de precipitación durante la jornada de observación. No obstante, los registros agroclimáticos mostraron una acumulación superior a 50 mm durante las dos semanas previas. Este patrón sugiere que la actividad luminosa observada podría estar más estrechamente vinculada a procesos ecológicos acumulativos relacionados con la disponibilidad de humedad en el suelo y la hojarasca que con las condiciones atmosféricas inmediatas.

Esta interpretación coincide con investigaciones previas que señalan que gran parte del ciclo biológico de las luciérnagas depende de ambientes húmedos capaces de sostener el desarrollo larval y la disponibilidad de presas asociadas a los horizontes superficiales del suelo (Lewis et al., 2020). Desde esta perspectiva, la precipitación antecedente constituye una variable integradora que refleja procesos ecológicos de mayor profundidad temporal que los registros meteorológicos diarios.

Asimismo, los resultados sugieren que la humedad antecedente podría funcionar como una señal ambiental que regula la sincronización de la emergencia de adultos reproductivos. Esta posibilidad adquiere especial relevancia en regiones montañosas donde la estacionalidad de las lluvias constituye uno de los principales organizadores ecológicos de la biodiversidad. En consecuencia, la incorporación de acumulados de precipitación dentro del IFL-GORRION v1.0 representa una decisión metodológica coherente con la ecología conocida de Lampyridae.

La temperatura media antecedente también mostró una asociación consistente con el evento observado. Los valores cercanos a 15.5 °C registrados durante las semanas previas coinciden con rangos térmicos considerados favorables para diversos procesos fisiológicos de insectos asociados a ambientes templados (Sharma et al., 2014). Sin embargo, los resultados indican que la temperatura debe interpretarse en interacción con otras variables ambientales y no como un factor explicativo independiente.

Esta observación resulta relevante porque cuestiona enfoques simplificados que buscan identificar una única variable controladora de la actividad fenológica. Desde la perspectiva de los sistemas complejos, los fenómenos biológicos emergen a partir de configuraciones relacionales donde múltiples

factores interactúan simultáneamente (García, 2006). En este sentido, la actividad luminosa observada puede entenderse como una propiedad emergente resultante de la combinación de humedad acumulada, temperatura, estabilidad atmosférica, estructura del bosque, disponibilidad de microhábitats y dinámicas poblacionales.

El comportamiento observado del viento refuerza esta interpretación. Aunque la literatura especializada ha prestado menor atención a esta variable, las velocidades inferiores a 5 km h⁻¹ registradas durante el periodo de análisis sugieren condiciones favorables para la comunicación luminosa y el desplazamiento de individuos. Es probable que velocidades reducidas contribuyan a mejorar la detectabilidad visual de las señales de cortejo, facilitando la interacción entre machos y hembras.

Más allá de la interpretación ecológica de las variables individuales, uno de los aportes centrales del estudio radica en la construcción de una aproximación metodológica capaz de integrar diferentes escalas y tipos de información. En contraste con los enfoques convencionales de monitoreo biológico, el SIT-Luciérnagas articula datos ambientales automatizados, observaciones fenológicas y evidencia biocultural dentro de una arquitectura común de observación territorial.

Esta integración adquiere especial relevancia en el contexto de las tendencias internacionales hacia el monitoreo automatizado de biodiversidad. Diversos autores han señalado que la combinación de sensores ambientales, sistemas de observación remota, aprendizaje automático y ciencia ciudadana representa una de las principales fronteras de investigación en conservación biológica (Tuia et al., 2022; Besson et al., 2022). Sin embargo, gran parte de estos desarrollos se han concentrado en contextos tecnológicos altamente especializados y con elevados requerimientos de infraestructura.

El enfoque desarrollado en el presente estudio propone una alternativa complementaria basada en la construcción de capacidades territoriales de observación. En lugar de depender exclusivamente de tecnologías sofisticadas, el sistema integra estaciones agroclimáticas, observadores comunitarios y registros fotográficos dentro de una estrategia de vigilancia biocultural. Este enfoque resulta particularmente pertinente para regiones rurales donde la participación social constituye un recurso fundamental para

ampliar la cobertura espacial y temporal de los programas de monitoreo.

Desde esta perspectiva, los resultados obtenidos respaldan la relevancia del monitoreo comunitario como componente estratégico de los sistemas de observación ambiental. Danielsen et al. (2022) señalan que los esquemas participativos pueden generar información de alta calidad cuando son adecuadamente articulados con procesos científicos formales. La experiencia desarrollada en Bosque Esmeralda sugiere que la observación de luciérnagas puede constituir un punto de encuentro entre conocimiento científico, conocimiento local y apropiación social de la información ambiental.

Esta dimensión participativa adquiere una importancia aún mayor cuando se analiza desde el Paradigma Emergente de Inteligencia Territorial Biocultural (PEITB). De acuerdo con este marco conceptual, los territorios deben entenderse como sistemas sociotécnicos complejos donde la producción de conocimiento emerge de la interacción entre actores humanos, infraestructuras tecnológicas, componentes ecológicos e instituciones (Sánchez Jiménez, 2026a). Bajo esta lógica, la estación meteorológica Cuatexotli 01 no constituye únicamente un instrumento de medición, sino un nodo dentro de una red territorial de observación y aprendizaje colectivo.

La evidencia obtenida durante esta investigación muestra que la producción de conocimiento fenológico no depende exclusivamente de los sensores ni exclusivamente de los observadores. Por el contrario, surge de la articulación entre ambos componentes mediante procesos de interpretación territorial. Esta observación coincide con los principios de co-producción del conocimiento planteados por el PEITB, donde la generación de inteligencia territorial implica la integración de múltiples formas de conocimiento y experiencia.

En términos conceptuales, este hallazgo representa uno de los aportes más relevantes del estudio. Tradicionalmente, los trabajos sobre luciérnagas se han centrado en aspectos taxonómicos, ecológicos o conductuales (Lewis & Cratsley, 2008; Owens & Lewis, 2022). En contraste, el SIT-Luciérnagas propone una aproximación que incorpora explícitamente dimensiones territoriales, tecnológicas y bioculturales al análisis del fenómeno.

Asimismo, los resultados sugieren que las luciérnagas pueden desempeñar un

papel como bioindicadores territoriales dentro de los Sistemas Campesinos de Montaña Templados Subhúmedos. La actividad luminosa observada parece reflejar no solamente condiciones climáticas favorables, sino también la existencia de estructuras ecológicas funcionales capaces de sostener procesos biológicos complejos. En este sentido, las luciérnagas podrían constituir indicadores sensibles de la calidad ecosistémica y de la integridad biocultural del territorio.

Sin embargo, es importante reconocer las limitaciones del estudio. La principal restricción corresponde al reducido número de eventos fenológicos disponibles para la calibración inicial del modelo. Aunque la coherencia observada entre las condiciones ambientales y el valor obtenido por el IFL-GORRION resulta alentadora, todavía no es posible establecer relaciones predictivas robustas ni estimar niveles precisos de incertidumbre.

Asimismo, variables potencialmente relevantes como fase lunar, cobertura nubosa, humedad del suelo, contaminación lumínica y estructura forestal aún no han sido incorporadas de manera sistemática. Diversos estudios han documentado la importancia de estos factores para la actividad de las luciérnagas (Longcore & Rich, 2004; Owens et al., 2022; Vaz et al., 2021), por lo que su integración constituye una prioridad para futuras versiones del sistema.

Finalmente, los resultados obtenidos permiten considerar al SIT-Luciérnagas como una experiencia inicial exitosa de aplicación del Paradigma Emergente de Inteligencia Territorial Biocultural a la observación de fenómenos ecológicos. La investigación demuestra que la integración entre monitoreo agroclimático, vigilancia biocultural y análisis territorial puede generar herramientas innovadoras para comprender la dinámica fenológica de organismos bioluminiscentes. Más importante aún, evidencia que las luciérnagas pueden convertirse en un punto de entrada privilegiado para fortalecer procesos de inteligencia territorial, apropiación social del conocimiento y conservación biocultural en regiones montañosas del centro de México.

5. CONCLUSIONES

La presente investigación permitió desarrollar y evaluar preliminarmente el Sistema de Inteligencia Territorial para la Predicción Fenológica de Luciérnagas (SIT-Luciérnagas), una propuesta innovadora que

integra monitoreo agroclimático, vigilancia biocultural y análisis territorial para comprender y anticipar eventos de actividad luminosa en ecosistemas montañosos templados subhúmedos del centro de México. A diferencia de los enfoques tradicionales centrados exclusivamente en variables ecológicas o registros biológicos aislados, este trabajo abordó el fenómeno desde una perspectiva sistémica, reconociendo que la actividad de las luciérnagas emerge de la interacción dinámica entre factores ambientales, tecnológicos, sociales y culturales que operan simultáneamente dentro de un territorio.

Los resultados obtenidos demuestran que la integración de información agroclimática procedente de la estación Cuatexoxtle 01 con observaciones fenológicas y evidencia fotográfica constituye una estrategia metodológicamente viable para generar conocimiento predictivo sobre la ocurrencia de eventos de actividad luminosa. La evidencia preliminar sugiere que la precipitación acumulada antecedente, la temperatura media de las semanas previas y las condiciones de estabilidad atmosférica desempeñan un papel relevante en la configuración de escenarios favorables para la emergencia y actividad reproductiva de las luciérnagas. Particularmente, la acumulación superior a 50 mm de precipitación durante los quince días previos al evento documentado mostró una estrecha correspondencia con la intensidad observada, respaldando la hipótesis de que los procesos hidrológicos acumulativos poseen una mayor capacidad explicativa que las condiciones meteorológicas instantáneas registradas durante la noche de observación.

Uno de los principales aportes científicos de esta investigación consiste en la construcción y aplicación inicial del Índice Fenológico de Luciérnagas IFL-GORRION v1.0 como módulo operativo del SIT-Luciérnagas. La coherencia observada entre los valores estimados por el índice y la intensidad registrada durante el evento de referencia proporciona evidencia preliminar sobre la utilidad del modelo para representar condiciones ambientales favorables para la actividad luminosa. Aunque la validación estadística formal requerirá una base de datos multianual y un mayor número de observaciones, los resultados obtenidos indican que la estructura conceptual del índice posee consistencia ecológica y potencial para evolucionar hacia sistemas predictivos de mayor precisión.

Sin embargo, la contribución más relevante del estudio trasciende la construcción del índice mismo. El SIT-Luciérnagas representa una aplicación empírica del Paradigma Emergente de Inteligencia Territorial Biocultural (PEITB), demostrando que los procesos de monitoreo ambiental pueden transformarse en sistemas de generación de inteligencia territorial cuando integran información científica, capacidades tecnológicas y conocimiento territorial. Desde esta perspectiva, las estaciones meteorológicas dejan de ser simples instrumentos de registro para convertirse en nodos de observación dentro de redes sociotécnicas capaces de producir información útil para la toma de decisiones, la conservación biocultural y la gestión adaptativa del territorio.

Los resultados también muestran que la vigilancia biocultural constituye un componente estratégico para fortalecer los procesos de observación ambiental. La incorporación de registros fotográficos, observaciones de campo y participación territorial permitió ampliar la capacidad de interpretación del fenómeno, demostrando que la generación de conocimiento sobre biodiversidad puede enriquecerse significativamente mediante esquemas de co-producción entre comunidades, investigadores e infraestructuras tecnológicas. Esta integración resulta especialmente relevante en contextos rurales y montañosos donde las capacidades institucionales de monitoreo suelen ser limitadas y donde los conocimientos locales representan una fuente valiosa de información ambiental.

Asimismo, la investigación aporta elementos para reconsiderar el papel de las luciérnagas dentro de los Sistemas Campesinos de Montaña Templados Subhúmedos. Más allá de su valor estético, turístico o biológico, estos organismos pueden ser entendidos como indicadores sensibles de la funcionalidad socioecológica del territorio. La presencia de eventos de alta actividad luminosa parece asociarse a condiciones favorables de humedad, integridad forestal y estabilidad ambiental, lo que sugiere que las luciérnagas poseen potencial como bioindicadores territoriales capaces de reflejar transformaciones ecológicas de mayor escala. En consecuencia, su monitoreo sistemático puede contribuir no solamente a la conservación de una especie o grupo taxonómico, sino también al seguimiento de procesos ambientales relevantes para la

resiliencia territorial.

Desde una perspectiva metodológica, el estudio demuestra la viabilidad de articular enfoques provenientes de la agroclimatología, la fenología, la ciencia ciudadana, la vigilancia biocultural y la inteligencia territorial dentro de una misma arquitectura de observación. Esta integración constituye una innovación relevante para América Latina, donde aún son escasos los sistemas capaces de combinar monitoreo ambiental automatizado con procesos participativos de generación de conocimiento. En este sentido, el SIT-Luciérnagas puede considerarse una experiencia piloto con potencial de replicación en otros territorios interesados en fortalecer capacidades locales de monitoreo y gestión ambiental.

No obstante, los resultados deben interpretarse considerando las limitaciones propias de una fase inicial de investigación. La principal restricción corresponde al reducido número de eventos fenológicos disponibles para la calibración del sistema. La validación realizada se fundamenta en un conjunto limitado de observaciones, por lo que no permite establecer relaciones causales definitivas ni cuantificar niveles robustos de incertidumbre. Del mismo modo, variables potencialmente relevantes como fase lunar, humedad del suelo, cobertura nubosa, contaminación lumínica, estructura forestal y características específicas de las poblaciones de luciérnagas aún no han sido incorporadas sistemáticamente al modelo.

Estas limitaciones, lejos de constituir una debilidad insalvable, delinear una agenda clara para el desarrollo futuro del sistema. La continuidad del monitoreo durante las temporadas 2026 y 2027 permitirá ampliar significativamente la base de datos fenológicos y agroclimáticos, fortaleciendo los procesos de calibración y validación estadística. Asimismo, la incorporación de nuevas variables ambientales, técnicas de visión computacional, sensores automatizados y algoritmos de aprendizaje automático abrirá oportunidades para incrementar la precisión predictiva del sistema y avanzar hacia esquemas de monitoreo en tiempo casi real.

En términos prospectivos, el SIT-Luciérnagas constituye únicamente el primer módulo de una plataforma más amplia de inteligencia territorial biocultural impulsada por el proyecto GORRION y el Laboratorio de Inteligencia Territorial y Vigilancia Biocultural (LABIT). La experiencia obtenida demuestra que fenómenos aparentemente

específicos, como la actividad luminosa de las luciérnagas, pueden convertirse en puntos de entrada para construir sistemas territoriales de observación capaces de integrar biodiversidad, clima, conocimiento local y gobernanza ambiental. Esta capacidad de articulación representa uno de los principales aportes del enfoque desarrollado.

Finalmente, se concluye que la predicción fenológica de luciérnagas no debe entenderse únicamente como un problema ecológico o meteorológico, sino como un desafío de inteligencia territorial. La actividad luminosa observada emerge de relaciones complejas entre procesos climáticos, ecológicos, tecnológicos y socioculturales que requieren enfoques integradores para su comprensión. Bajo esta lógica, el SIT-Luciérnagas y el IFL-GORRION v1.0 constituyen una propuesta pionera para la observación y gestión de fenómenos socioecológicos complejos, aportando una base conceptual y metodológica para el desarrollo de sistemas de vigilancia biocultural orientados a fortalecer la conservación, la resiliencia territorial y la apropiación social del conocimiento en los ecosistemas de montaña del centro de México.

6. REFERENCIAS

- Besson, M., Alison, J., Bjerger, K., Gorochoowski, T. E., Halstead, M., Høye, T. T., Jucker, T., Mann, H. M. R., Morris, R. J., & Simmons, B. I. (2022). Towards fully automated monitoring of ecological communities. *Ecology Letters*, 25(12), 2753–2775. <https://doi.org/10.1111/ele.14123>
- Besson, M., et al. (2022). *Towards fully automated monitoring of ecological communities*. *Ecology Letters*, 25, 2753–2775.
- Carlson, A. D., & Copeland, J. (1985). Flash communication in fireflies. *The Quarterly Review of Biology*, 60(4), 415–436.
- Danielsen, F., Burgess, N. D., Coronado, I., Holt, S., Poulsen, M. K., Reenberg, A., Skutsch, M., Stuart-Hill, G., Topp-Jørgensen, E., & Yonten, D. (2022). Community monitoring of natural resource and environment systems. *Annual Review of Environment and Resources*, 47, 637–670. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-012220-022325>
- Danielsen, F., et al. (2022). *Community monitoring of natural resource and environment systems*. *Annual Review of Environment and Resources*, 47, 637–670.
- Fallon, C. E., Walker, A. C., Lewis, S. M., Jepsen, S., Young, M., Schweitzer, D. F., Heckscher, C. M., Stanger-Hall, K. F., & Lloyd, J. E. (2021). Evaluating firefly extinction risk: Initial red list assessments for North America. *PLoS ONE*, 16(11), e0259379. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0259379>
- Fallon, C., Walker, A., Lewis, S., & Jepsen, S. (2022). *State of the fireflies of the United States and Canada: Distributions, threats, and conservation recommendations*. Xerces Society for Invertebrate Conservation.
- García, R. (2006). *Sistemas complejos: Conceptos, método y fundamentación epistemológica de la investigación interdisciplinaria*. Gedisa.
- Goh, K.-S., Lee, C.-M., & Wang, T.-Y. (2022). Species-specific flash patterns track nocturnal behavior of sympatric Taiwanese fireflies. *Biology*, 11(1), 58. <https://doi.org/10.3390/biology11010058>
- Lewis, S. M., & Cratsley, C. K. (2008). Evolution of flash signals, mate choice, and predation in fireflies. *Annual Review of Entomology*, 53, 293–321. <https://doi.org/10.1146/annurev.ento.53.103106.093346>
- Lewis, S. M., Wong, C. H., Owens, A. C. S., Fallon, C., Jepsen, S., Thancharoen, A., Wu, C., De Cock, R., Novák, M., López-Palafox, T., Santos, P. V., & Reed, J. M. (2020). A global perspective on firefly extinction threats. *BioScience*, 70(2), 157–167. <https://doi.org/10.1093/biosci/biz157>
- Lloyd, J. E. (1966). Flash signals in fireflies. *The Coleopterists Bulletin*, 20(4), 84–90.
- Lloyd, J. E. (1983). Bioluminescence and communication in insects. *Annual Review of Entomology*, 28, 131–160. <https://doi.org/10.1146/annurev.en.28.010183.001023>
- Longcore, T., & Rich, C. (2004). Ecological light pollution. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2(4), 191–198. [https://doi.org/10.1890/1540-9295\(2004\)002\[0191:ELP\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2004)002[0191:ELP]2.0.CO;2)
- McElroy, W. D., Seliger, H. H., & White, E. H. (1969). Mechanism of bioluminescence, chemiluminescence and enzyme function in the oxidation of firefly luciferin. *Photochemistry and Photobiology*, 10(2), 153–170.
- Owens, A. C. S., & Lewis, S. M. (2018). The impact of artificial light at night on nocturnal insects: A review and synthesis. *Ecology and Evolution*, 8(22), 11337–11358. <https://doi.org/10.1002/ece3.4557>
- Owens, A. C. S., & Lewis, S. M.

(2022). Firefly conservation: A review and research agenda. *Insect Conservation and Diversity*, 15(1), 1–15.
<https://doi.org/10.1111/icad.12527>

Owens, A. C. S., Van den Broeck, M., De Cock, R., & Lewis, S. M. (2022). Behavioral responses of bioluminescent fireflies to artificial light at night. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 10, 948.
<https://doi.org/10.3389/fevo.2022.857640>

Sánchez Jiménez, E. (2026a). *Paradigma Emergente de Inteligencia Territorial Biocultural: Ontología Relacional, Epistemología de Co-Producción y Matriz de Evaluación de Sistemas Sociotécnicos Territoriales Complejos*.
<https://doi.org/10.63371/ic.v5.n2.a1001>

Sánchez Jiménez, E. (2026b). Modelo predictivo eco-epidemiológico del gusano barrenador del ganado (*Cochliomyia hominivorax*) basado en redes agroclimáticas en Estado de México. *REDSA Ecuadorian Journal of Social and Environmental Development*, 1(1), 85–102.
<https://doi.org/10.66646/0d7egw40>

Sánchez-Bayo, F., & Wyckhuys, K. A. G. (2019). Worldwide decline of the entomofauna: A review of its drivers. *Biological Conservation*, 232, 8–27.
<https://doi.org/10.1016/j.biocon.2019.01.020>

Sharma, U., Goswami, A., Phukan, M., Rajbongshi, S. C., & Barua, A. G. (2014). Temperature dependence of flash duration in the firefly *Luciola praeusta*. *Photochemical & Photobiological Sciences*, 13(12), 1788–1792.
<https://doi.org/10.1039/C4PP00319E>

Stanger-Hall, K. F., & Lloyd, J. E. (2015). Flash signal evolution in *Photinus* fireflies: Character displacement and signal exploitation in a visual communication system. *Evolution*, 69(3), 666–682.
<https://doi.org/10.1111/evo.12606>

Tuia, D., Kellenberger, B., Beery, S., Costelloe, B. R., Zuffi, S., Risse, B., Mathis, A., Mathis, M. W., van Langevelde, F., Burghardt, T., Kays, R., Klinck, H., Wikelski, M., Couzin, I. D., van Horn, G., Crofoot, M. C., Stewart, C. V., & Berger-Wolf, T. (2022). Perspectives in machine learning for wildlife conservation. *Nature Communications*, 13, 792. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-27980-y>

Vaz, S., Manenti, R., Correa, B. S., Macedo, R. H., & de Medeiros, B. A. S. (2021). Light pollution is the fastest growing threat to firefly conservation in the Atlantic Forest hotspot. *Insect Conservation and Diversity*, 14(2), 211–224.

<https://doi.org/10.1111/icad.12481>