

CAPÍTULO 6

RESPUESTAS ADAPTATIVAS DE *Tillandsia Recurvata* (HENO MOTITA) AL CAMBIO CLIMÁTICO Y LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LA REGIÓN DE TULA DE ALLENDE, HIDALGO



<https://doi.org/10.22533/at.ed.507112501046>

Data de aceite: 19/11/2025

Marisol Resendiz Vega

Universidad Tecnológica de Tula-Tepeji

Jose Alberto García Melo

Universidad Tecnológica de Tula-Tepeji

Eduardo Hernández Sánchez

Universidad Tecnológica de Tula-Tepeji

INTRODUCCIÓN (PRIMER NIVEL. ATAJO DE TECLADO: ALT+1)

El cambio climático se ha convertido en uno de los mayores desafíos ambientales y científicos del siglo XXI, debido a sus efectos transversales sobre los ecosistemas, la biodiversidad y los servicios ambientales de los que depende la vida humana (IPCC, 2023). El aumento de las temperaturas globales, la modificación de los patrones de precipitación y la intensificación de eventos climáticos extremos están alterando la estructura y el funcionamiento de comunidades vegetales en todo el mundo. En regiones que históricamente presentaban un clima templado, estos cambios han generado desequilibrios ecológicos significativos, evidenciados en la alteración de ciclos

fenológicos, procesos reproductivos y distribución espacial de múltiples especies vegetales (Allen et al., 2015; Peñuelas et al., 2017).

En México, los impactos del cambio climático se han manifestado de manera desigual, pero con efectos particularmente notables en regiones con alta concentración industrial, donde las emisiones de contaminantes atmosféricos actúan sinérgicamente con las variaciones térmicas para agravar los procesos de degradación ambiental (INECC, 2020). En el Valle del Mezquital, y específicamente en la región de Tula de Allende, Hidalgo, se ha documentado un aumento sostenido de la temperatura media anual, acompañado de una disminución en la calidad del aire atribuida a las emisiones provenientes del complejo industrial que incluye refinerías, cementerías y termoeléctricas (SEMARNAT, 2022). Estas condiciones están generando presiones ambientales que afectan la fisiología y ecología de la vegetación local, propiciando respuestas adaptativas observables en especies nativas y oportunistas.

Entre estas especies destaca *Tillandsia recurvata* (heno motita), una bromelia epífita ampliamente distribuida en América Latina, reconocida por su capacidad para colonizar ambientes con alto grado de perturbación (Chaves & Rossini, 2019). Esta especie presenta una notable tolerancia a condiciones extremas, ya que obtiene la mayor parte de su agua y nutrientes directamente de la atmósfera a través de tricomas especializados. Sin embargo, diversos estudios recientes han evidenciado que *T. recurvata* incrementa su biomasa y densidad poblacional en zonas con elevados niveles de contaminación atmosférica, lo que sugiere que ciertos contaminantes —en particular compuestos nitrogenados y material particulado— podrían estar actuando como fuentes suplementarias de nutrientes (Cervantes-Sánchez et al., 2019; López-Hernández et al., 2021).

La proliferación descontrolada de esta bromelia tiene implicaciones ecológicas importantes. Al establecerse sobre ramas y troncos de árboles vivos, *T. recurvata* actúa inicialmente como epífita inofensiva, pero al aumentar su biomasa genera una carga excesiva que reduce la capacidad fotosintética del hospedero, acelera la desecación de tejidos y, en casos severos, conduce a la muerte del árbol (Martínez-Sánchez et al., 2022). Además, algunos autores han reportado posibles efectos alelopáticos ejercidos por metabolitos secundarios liberados por la bromelia, que podrían inhibir el crecimiento de brotes y hojas del hospedero (Rebollo-Vargas et al., 2020). Esta interacción negativa favorece la pérdida progresiva de la cubierta forestal, comprometiendo la función ecológica de los ecosistemas urbanos y periurbanos.

Aunado a su proliferación, se ha observado un fenómeno reproductivo inusual: la **viviparidad**, entendida como la germinación de semillas dentro del fruto antes de su dispersión. Este proceso, aunque poco común en bromelias, ha sido reportado como una posible respuesta adaptativa al estrés ambiental, especialmente en contextos de alta temperatura y baja disponibilidad hídrica (Cascante-Marín et al., 2018). En el caso de *T. recurvata*, la viviparidad podría representar una estrategia de supervivencia que garantiza la continuidad de la especie ante condiciones ambientales adversas, reduciendo el riesgo de mortalidad de las semillas expuestas al medio contaminado y seco.

En la región de Tula de Allende, las condiciones microclimáticas actuales —altas temperaturas, baja humedad y concentraciones elevadas de contaminantes como SO₂, NO_x y material particulado fino (PM₁₀ y PM_{2.5})— proporcionan un escenario idóneo para que estas adaptaciones se manifiesten con mayor frecuencia (INECC, 2020; SEMARNAT, 2022). La combinación de factores climáticos y contaminantes ha favorecido el establecimiento y expansión masiva de *T. recurvata*, que ha pasado de ser una especie indicadora de contaminación atmosférica a constituirse en un agente activo de degradación ecológica. Su proliferación no solo representa un síntoma del deterioro ambiental, sino también un problema ecológico que amenaza la regeneración natural de los ecosistemas forestales y urbanos en la zona de restauración ecológica de la Presa Endhó.

Este trabajo se propone analizar los efectos del cambio climático y la contaminación atmosférica sobre la proliferación y la expresión de viviparidad en *Tillandsia recurvata* en la región de Tula de Allende, Hidalgo. El estudio pretende aportar evidencia empírica sobre los mecanismos adaptativos de la especie frente a condiciones ambientales extremas, así como sobre las implicaciones ecológicas de su proliferación en la pérdida de la cubierta forestal local. Comprender la relación entre cambio climático, contaminación y biología adaptativa de *T. recurvata* permitirá fortalecer las estrategias de restauración ecológica y diseñar políticas ambientales orientadas a mitigar los efectos de este fenómeno en ecosistemas altamente vulnerables.

OBJETIVO GENERAL

Analizar la relación entre los factores asociados al cambio climático y la contaminación atmosférica con la proliferación y la expresión de viviparidad en *Tillandsia recurvata* dentro de la zona de restauración ecológica de la Presa Endhó, Hidalgo, con el fin de identificar los mecanismos fisiológicos y adaptativos que favorecen su supervivencia y expansión en ambientes con alta carga contaminante y estrés térmico.

METODOLOGÍA

El presente estudio se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo con apoyo de herramientas cualitativas, por lo que se considera de carácter mixto. El componente cuantitativo se sustenta en la recopilación sistemática de datos ambientales y biológicos —como parámetros climáticos, concentraciones de contaminantes atmosféricos y frecuencias de estructuras reproductivas con viviparidad— que permiten establecer correlaciones objetivas entre las condiciones ambientales y las respuestas fenológicas de *Tillandsia recurvata*. El componente cualitativo se fundamenta en la observación directa de los organismos y en la interpretación ecológica de las respuestas adaptativas, lo que en conjunto posibilita una comprensión integral del fenómeno desde una perspectiva ecológica y fisiológica.

De acuerdo con los objetivos planteados, la investigación se clasifica como descriptiva y exploratoria. Es descriptiva porque caracteriza las condiciones ambientales y biológicas actuales de la especie *Tillandsia recurvata* dentro del área de estudio, detallando su estado reproductivo y los factores de contaminación asociados. Es exploratoria, debido a que el fenómeno de viviparidad en esta especie epífita no ha sido ampliamente documentado en la región de Tula de Allende, Hidalgo, ni en contextos similares afectados por emisiones industriales y variaciones climáticas extremas. Por tanto, el estudio busca generar información inicial que siente las bases para futuras investigaciones explicativas sobre los mecanismos fisiológicos que inducen este tipo de reproducción en condiciones de estrés ambiental.

El estudio se llevó a cabo en el campus de la Universidad Tecnológica de Tula-Tepeji (UTTT), localizado dentro de la Zona de Restauración Ecológica de la Presa Endhó, un

área que representa un microambiente de transición entre ecosistemas semiáridos y zonas industrializadas. Durante el trimestre junio-julio y agosto se realizaron muestreos aleatorios en diez áreas diferenciadas del campus, considerando variaciones en cobertura vegetal, exposición solar y proximidad a fuentes de contaminación. De cada área se recolectaron fragmentos de *Tillandsia recurvata* adheridos a distintos árboles hospedadores, conformando una muestra compuesta representativa. La NOM-011- SEMARNAT-1996, para realizar la recolección de las motas de heno en bolsas estériles de plástico, de tal manera que no se alteraran las estructuras. En laboratorio, las estructuras reproductivas fueron observadas bajo microscopio estereoscópico, identificando la presencia de viviparidad mediante la detección de embriones o plántulas en desarrollo dentro del fruto.

Dentro del laboratorio se procedió como sigue:

1. Se colocaron las muestras sobre charolas y éstas sobre la mesa del laboratorio y se etiquetaron marcando el lugar de recolección.
2. De las motas recolectadas se registraron observaciones fenomenológicas con énfasis en las estructuras reproductivas poniendo especial atención en la identificación de frutos con signos de viviparidad, tomando como referencia los criterios fotográficos reportados por Pérez-Noyola et al., (2020). Las estructuras fueron fotografiadas para su análisis comparativo.
3. Se observaron los frutos directamente y con ayuda de un microscopio óptico, con objetivos 4X, 10X.
4. Se recolectaron frutos verdes, maduros (como una nueva línea de investigación se probará la viviparidad *in vitro*) y con viviparidad, colocándolos en sendas cajas de petri en condiciones de esterilidad por separado.
5. Se tomó nota y fotografías de las observaciones y allazgos.

Paralelamente, en coordinación con la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales del Estado de Hidalgo (SEMARNATH), se recopilaron registros de temperatura, humedad relativa, radiación solar y concentraciones de contaminantes atmosféricos (SO_2 , NO_x , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ y ozono) correspondientes al periodo de muestreo. Los datos fueron analizados mediante estadística descriptiva y correlacional para establecer tendencias preliminares entre los factores ambientales y la ocurrencia de viviparidad.

RESULTADOS

Área de estudio

La zona de restauración ecológica de la Presa Endhó se localiza en la región sur del estado de Hidalgo, México, y comprende una superficie aproximada de 540 km² distribuida entre los municipios de Tula de Allende, Tepeji del Río de Ocampo, Tlaxcoapan, Tepetitlán, Tezontepec de Aldama, Atotonilco de Tula, Atitalaquia y Tlahuelilpan. Esta zona forma parte de la cuenca alta del río Tula, un sistema hidrológico que recibe aportaciones de aguas

residuales provenientes del Valle de México y cuya dinámica ambiental ha sido fuertemente modificada por actividades industriales, agrícolas y urbanas (CONAGUA, 2022).

En la Figura 1 se observa la delimitación geográfica de esta área (línea roja), que incluye tanto zonas de uso industrial y urbano —particularmente en los municipios de Tula de Allende, Atitalaquia y Atotonilco de Tula— como sectores agrícolas y semidesérticos distribuidos en Tezontepec, Tlaxcoapan y Tepetitlán. Al centro del sistema se localiza la Presa Endhó, cuerpo de agua que funciona como vaso regulador y punto de acumulación de contaminantes atmosféricos y acuáticos, generando un microclima caracterizado por altas temperaturas, baja humedad relativa y presencia constante de aerosoles industriales (INECC, 2020; SEMARNAT, 2023).

El relieve predominante es ligeramente ondulado, con altitudes que oscilan entre 1,900 y 2,300 m s. n. m., y su vegetación potencial corresponde a matorral xerófilo y pastizal inducido (Rzedowski, 2006). Actualmente se observan amplias áreas de degradación y pérdida de cobertura vegetal natural debido a la deforestación y la expansión urbana e industrial (García & Vázquez, 2021). La influencia de la Refinería “Miguel Hidalgo”, la Central Termoeléctrica de Tula, así como diversas cementeras y fábricas de cal, contribuye a las elevadas concentraciones de contaminantes como dióxido de azufre (SO_2), óxidos de nitrógeno (NO_x), ozono (O_3), monóxido de carbono (CO) y partículas suspendidas (PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$) (INECC, 2020; Sosa et al., 2022).

De acuerdo con la clasificación climática de Köppen modificada por García (2004), el clima predominante en la región es semiseco templado (BS1kw), con temperatura media anual de 18 °C y precipitaciones que oscilan entre 500 y 700 mm anuales, concentradas principalmente entre los meses de junio y septiembre. Las condiciones de baja humedad y alta radiación solar, aunadas al incremento en las emisiones industriales, propician un ambiente favorable para la proliferación de especies epífitas resistentes al estrés ambiental, como *Tillandsia recurvata* (Zepeda et al., 2023).

Por lo anterior, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) ha catalogado esta zona como un sitio prioritario para restauración ecológica, con énfasis en la recuperación de suelos, la revegetación con especies nativas —como *Prosopis laevigata* y *Acacia farnesiana*— y el control de especies oportunistas. Dentro de estas, *T. recurvata* representa un desafío ecológico, ya que su proliferación está estrechamente asociada a la contaminación atmosférica y a las alteraciones microclimáticas derivadas del cambio climático local (Gómez-Meléndez et al., 2021; SEMARNAT, 2023).

Figura 1. Zona de restauración ecológica de la Presa Endhó, que incluye los municipios de Tula de Allende, Tepeji del Río de Ocampo, Tlaxcoapan, Tepetitlán, Tezontepec de Aldama, Atotonilco de Tula, Atitalaquia y Tlahuelilpan (elaboración propia con base en imágenes satelitales, 2025).

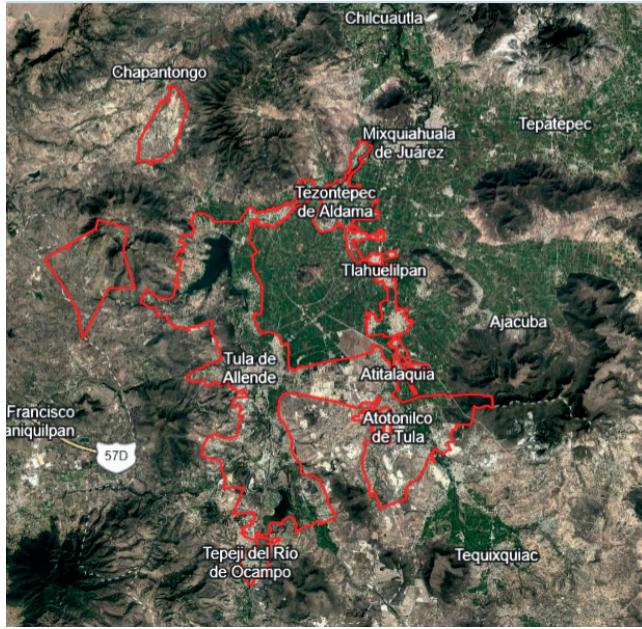


FIGURA 1. Zona de restauración Ecológica de la Presa Endhó

Fuente: Propia basada en el Decreto

En la Figura 2 se observa la ubicación de la Universidad Tecnológica de Tula-Tepeji (UTTT), la cual se encuentra dentro de los límites de la Zona de Restauración Ecológica de la Presa Endhó. Esta localización permite identificar su relevancia estratégica para el desarrollo de actividades académicas y proyectos ambientales orientados al monitoreo y recuperación del entorno natural afectado por los procesos de contaminación y degradación ambiental de la región.

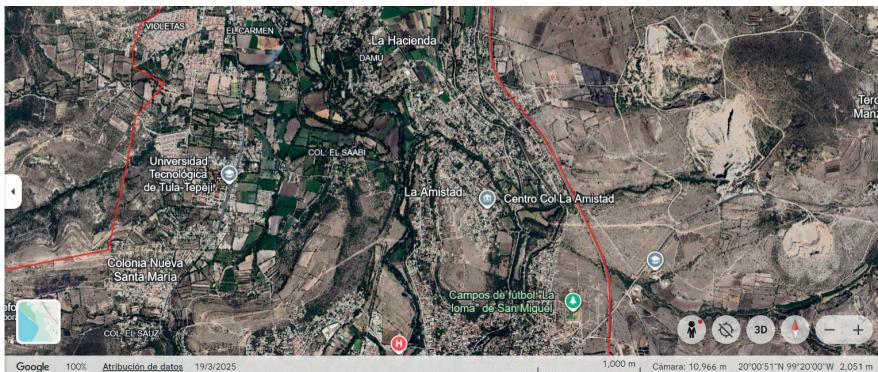


FIGURA 2. Ubicación de la Universidad Tecnológica de Tula-Tepeji

Fuente: Propia basada en el Decreto

En la gráfica 1 podemos observar las mediciones atmosféricas obtenidas en el municipio de Tula de Allende durante 2025 evidencian una marcada variación estacional en las concentraciones de contaminantes. Los registros de ozono (O_3), dióxido de azufre (SO_2), monóxido de carbono (CO) y material particulado (PM_{10} y $PM_{2.5}$) presentaron incrementos significativos entre los meses de junio, julio y agosto, alcanzando sus valores máximos en el periodo de mayor radiación solar y temperatura ambiental. En particular, el ozono superó los 100 ppb, el dióxido de azufre se mantuvo por encima de 150 ppb, mientras que las partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$ excedieron los 300 y 100 ppb, respectivamente. Estas concentraciones reflejan condiciones de alta contaminación atmosférica y estrés oxidativo ambiental, características del corredor industrial de Tula.

De manera concurrente, en las muestras de *Tillandsia recurvata* recolectadas durante estos mismos meses dentro del campus de la Universidad Tecnológica de Tula-Tepeji —ubicado en la zona de restauración ecológica de la Presa Endhó— se identificó la presencia de estructuras reproductivas con viviparidad, fenómeno consistente con respuestas adaptativas a condiciones ambientales extremas. La coincidencia temporal entre los picos de contaminación y la aparición de individuos vivíparos sugiere una correlación directa entre la exposición a contaminantes atmosféricos y la alteración de los procesos reproductivos de la especie.

A esto se suman las condiciones climáticas extremas que han afectado a la región en los últimos años, destacando las olas de calor y sequías prolongadas que se intensificaron en los meses de abril y mayo de 2025, cuando se registraron temperaturas superior a los 40°C (CONAGUA, 2025).

En la Gráfica 1 se observan las variaciones mensuales de los principales contaminantes atmosféricos registrados en la zona de restauración ecológica de la Presa Endhó, correspondientes a dióxido de nitrógeno (NO_2), dióxido de azufre (SO_2), material particulado (PM_{10} y $PM_{2.5}$), monóxido de carbono (CO) y ozono troposférico (O_3).

El dióxido de nitrógeno (NO_2) presentó concentraciones elevadas durante enero (~35 ppb), las cuales disminuyeron gradualmente entre junio y agosto (~5–10 ppb), para posteriormente incrementarse nuevamente hacia septiembre (~30 ppb). Este comportamiento sugiere que las emisiones derivadas del tráfico vehicular y de las actividades industriales predominan durante los meses iniciales del año, mientras que las menores concentraciones registradas entre junio y agosto se relacionan con una mayor dispersión atmosférica y con los procesos de lavado por precipitación. El incremento de septiembre podría atribuirse a la reactivación de la actividad industrial o a condiciones meteorológicas desfavorables para la dispersión de contaminantes.

En el caso del dióxido de azufre (SO_2), las concentraciones mostraron valores de fondo entre 120 y 150 ppb, con un incremento notorio hacia los meses intermedios del año (~300 ppb) y nuevos repuntes en agosto y septiembre (~180 ppb). Estas variaciones reflejan la influencia directa de las emisiones de la refinería y de procesos industriales

asociados, lo que sugiere la ocurrencia de paradas o arranques de planta, así como posibles modificaciones en el tipo de combustible utilizado.

Las concentraciones de material particulado (PM_{10} y $PM_{2.5}$) evidenciaron el patrón más marcado de variación mensual. PM_{10} alcanzó niveles elevados en enero (60–70 $\mu g/m^3$), reduciéndose entre junio y agosto (15–25 $\mu g/m^3$), con un nuevo incremento hacia septiembre (60 $\mu g/m^3$). $PM_{2.5}$ presentó un comportamiento similar, aunque con una segunda elevación intermedia atribuible a procesos de combustión y formación secundaria de aerosoles (sulfatos y nitratos). Los valores más bajos durante los meses centrales del año pueden explicarse por la deposición húmeda y el lavado atmosférico.

El monóxido de carbono (CO) mostró una tendencia paralela a la de NO_2 y PM, con concentraciones máximas en enero (1.0 mg/m³), mínimas en el periodo de junio a agosto (0.2–0.3 mg/m³) y un incremento posterior en septiembre (0.9 mg/m³). Esta evolución confirma su origen en procesos de combustión vehicular e industrial.

Finalmente, el ozono troposférico (O_3) evidenció un comportamiento inverso respecto a los contaminantes primarios, alcanzando sus valores máximos entre abril y agosto (65–70 ppb). Este aumento se asocia a la mayor radiación solar que favorece las reacciones fotoquímicas entre los precursores NO_x y COV, mientras que su disminución posterior refleja un descenso en la radiación incidente y un aumento en la nubosidad.

El estrés oxidativo generado por las altas concentraciones de ozono, dióxido de azufre y material particulado puede inducir daño en tejidos meristemáticos y disfunción hormonal en las plantas epífitas, desencadenando mecanismos de reproducción alternativa como la viviparidad. Este tipo de respuesta se interpreta como una estrategia de supervivencia que permite asegurar la continuidad de la especie bajo condiciones de contaminación crónica y degradación ambiental.

En síntesis, los resultados obtenidos en Tula durante el periodo junio–agosto muestran una sincronía entre la intensificación de la contaminación atmosférica y la expresión de viviparidad en *Tillandsia recurvata*, lo cual refuerza la hipótesis de que los contaminantes atmosféricos actúan como factores detonantes de estrés fisiológico capaces de modificar el patrón reproductivo natural de la especie. Este hallazgo constituye un primer indicio experimental dentro de la fase inicial del proyecto, y servirá como referencia para las siguientes etapas de muestreo en los ocho municipios que conforman la zona de restauración ecológica de la Presa Endhó.

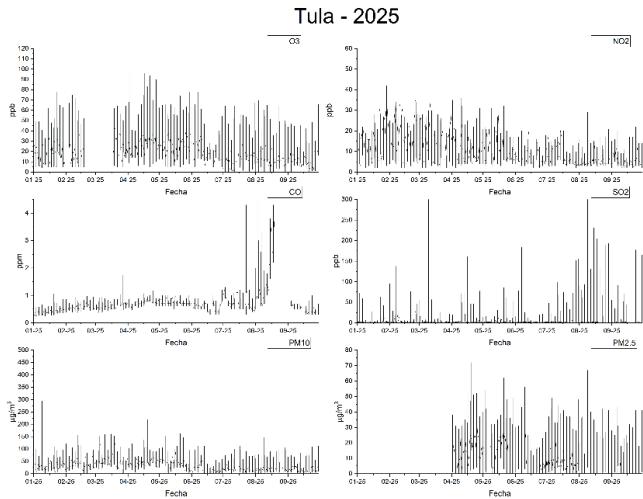


GRÁFICO 1. Concentraciones de O_3 , SO_2 , CO , PM_{10} y $PM_{2.5}$, durante 2025 en el Municipio de Tula de Allende, Hidalgo.

Nota: Elaboración propia con datos proporcionados por SEMARNATH, 2025

En la Figura 3. se aprecian estructuras reproductivas observadas en un ejemplar de *Tillandsia recurvata* recolectado en el municipio de Tula, Hidalgo. En la imagen se aprecia la coexistencia de diferentes fases reproductivas en una misma planta: (A) flores en antesis, (B) frutos en desarrollo o frescos, y (C) frutos maduros y secos, algunos de los cuales muestran evidencia de viviparidad verdadera. Este hallazgo confirma la asincronía reproductiva de la especie, en la que pueden encontrarse simultáneamente estructuras florales y frutos en distintos estados de maduración, lo que sugiere una respuesta adaptativa a condiciones ambientales variables, como las altas concentraciones de contaminantes atmosféricos y las temperaturas elevadas reportadas para la región (Pérez-Noyola et al., 2020).

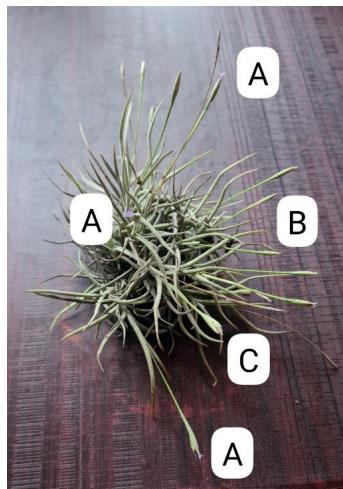


FIGURA 3. Estructuras reproductivas observadas en un ejemplar de *Tillandsia recurvata*
Fuente: Propia

Figura 4. Fruto de *Tillandsia recurvata* en etapa de maduración avanzada recolectado en el municipio de Tula, Hidalgo. Se observa una cápsula bivalva con una longitud aproximada de 4.5 cm, la cual comienza a abrirse desde el ápice, evidenciando el proceso de dehiscencia propio de la especie. La morfología del fruto corresponde a una cápsula linear alargada, con valvas delgadas y textura coriácea. Este tipo de estructura permite la liberación de semillas provistas de tricomas plumosos que facilitan su dispersión anemócora; sin embargo, en algunas cápsulas se ha registrado la presencia de plántulas en desarrollo, indicativo de viviparidad verdadera bajo condiciones ambientales específicas (Pérez-Noyola et al., 2020).



FIGURA 4. Fruto de *Tillandsia recurvata* en etapa de maduración avanzada recolectado en el municipio de Tula, Hidalgo

Fuente: Propia

En la Figura 5, se observa un Fruto de *Tillandsia recurvata* en proceso de dehiscencia, recolectado en la cuenca de la Presa Endhó, municipio de Tula, Hidalgo. La cápsula bivalva, de aproximadamente 4.5 cm de longitud, se encuentra parcialmente abierta, mostrando la liberación de semillas provistas de tricomas plumosos de color blanquecino, característicos de la especie. Estas estructuras facilitan la dispersión anemócora, permitiendo que las semillas se adhieran a superficies disponibles, como ramas o estructuras artificiales. La observación de este estadio fenológico permite inferir una fase avanzada de madurez reproductiva, y en casos específicos, bajo condiciones ambientales de alta temperatura y concentración de contaminantes, puede derivar en la expresión de viviparidad verdadera (Pérez-Noyola et al., 2020).



FIGURA 5. *Tillandsia recurvata* en proceso de dehiscencia, recolectado en la cuenca de la Presa Endhó.

Fuente: Propia

La figura 6, muestra una estructura reproductiva de *Tillandsia recurvata* (Bromeliaceae) en fase de viviparidad avanzada, característica poco común dentro del género. Se observa un eje floral que conserva la base del tubo floral y las brácteas externas parcialmente secas y abiertas, mientras que en su extremo distal emergen plántulas desarrolladas directamente desde el ovario.

Las plántulas presentan raíces primarias blancas y filamentosas, dispuestas radialmente y con apariencia vellosa, lo que sugiere el inicio de una fase autotrófica temprana. Este tipo de propagación evidencia un fenómeno de viviparidad verdadera, en el cual las semillas germinan antes de ser liberadas, probablemente inducido por estrés ambiental, como altas concentraciones de contaminantes atmosféricos (NO_2 , SO_2 y $\text{PM}_{2.5}$) y temperaturas elevadas, condiciones que, de acuerdo con Pérez-Noyola et al. (2020), pueden alterar la maduración de las semillas y estimular la germinación *in situ*.

El tejido del pedicelos y la base del ovario muestran una coloración pálida y translúcida, indicativa de deshidratación parcial, mientras que la superficie externa mantiene tricomas característicos del género *Tillandsia*, responsables de la absorción de humedad ambiental.

En conjunto, la figura documenta una evidencia morfológica clara de la respuesta adaptativa de *T. recurvata* a condiciones de estrés abiótico intenso, donde la viviparidad actúa como estrategia de supervivencia en ambientes con contaminación y alta radiación solar, como los observados en la cuenca de la Presa Endhó (Pérez-Noyola et al., 2020).



FIGURA 6. *Tillandsia recurvata* (Bromeliaceae) en fase de viviparidad avanzada

Fuente: Propia

DISCUSIÓN

Las observaciones registradas en las fotografías permiten evidenciar un comportamiento reproductivo atípico en *Tillandsia recurvata* dentro de la zona de restauración ecológica de la Presa Endhó. En la fotografía 3, la coexistencia de flores, frutos frescos, frutos secos y frutos con viviparidad verdadera en una misma planta sugiere una estrategia reproductiva simultánea que maximiza la dispersión y la supervivencia de la especie bajo condiciones ambientales adversas. Este fenómeno puede interpretarse como una respuesta adaptativa a factores de estrés ambiental, particularmente a la contaminación atmosférica y a la variabilidad microclimática de la región, los cuales influyen en la fenología y fisiología reproductiva de las bromelias epíticas (Benzing, 2000; Díaz & Moreno, 2019).

La presencia de frutos con viviparidad verdadera (ver figura 6), observada principalmente durante los meses de junio, julio y agosto, coincide con el incremento de temperatura y humedad relativa, condiciones que favorecen la germinación precoz de las semillas dentro del fruto. Este comportamiento indica un cambio fenológico posiblemente inducido por la exposición prolongada a contaminantes y estrés oxidativo, factores que pueden alterar los mecanismos hormonales responsables de la maduración y dispersión de las semillas (Pérez-Hernández et al., 2020).

En la fotografía 4, los frutos presentan distintos grados de madurez, lo que respalda la hipótesis de una asincronía reproductiva en las poblaciones locales. Finalmente, la fotografía 5, que muestra un fruto cerrado y otro abierto liberando semillas, refuerza la evidencia de que el ciclo reproductivo de *T. recurvata* en la región no ocurre de forma sincrónica, sino continua, lo que podría conferirle ventajas competitivas frente a otras especies vegetales en ambientes degradados. Este comportamiento ha sido documentado en otras zonas semiáridas de México donde *T. recurvata* se comporta como especie oportunista en ecosistemas alterados (Espejo-Serna et al., 2017).

Estos hallazgos sugieren que la viviparidad observada no es un evento aislado, sino un indicador biológico de alteraciones ambientales significativas que ameritan un análisis más profundo sobre los mecanismos de adaptación de esta especie ante condiciones de estrés inducidas por la contaminación atmosférica en la cuenca de la Presa Endhó.

CONCLUSIONES

- La presencia de viviparidad en *Tillandsia recurvata* constituye una respuesta adaptativa inducida por condiciones de estrés ambiental extremo, particularmente altas temperaturas, radiación solar intensa y concentraciones elevadas de contaminantes atmosféricos como SO₂, NO_x y material particulado fino.
- La coexistencia de flores, frutos frescos, frutos secos y frutos vivíparos en una misma planta demuestra un patrón fenológico asincrónico que permite la reproducción continua y la persistencia poblacional de la especie bajo condiciones ambientales fluctuantes.
- La correlación temporal entre los picos de contaminación (junio-agosto de 2025) y la aparición de estructuras vivíparas sugiere un vínculo directo entre el deterioro de la calidad del aire y la modificación de los procesos reproductivos naturales de la especie.
- La viviparidad observada podría considerarse un bioindicador sensible del impacto combinado del cambio climático y la contaminación atmosférica sobre los ecosistemas epífitos del corredor industrial Tula–Tepeji.
- Los resultados de esta fase inicial aportan evidencia científica que sustenta la necesidad de continuar el monitoreo en los ocho municipios que integran la zona de restauración ecológica de la Presa Endhó, a fin de incorporar estos hallazgos en estrategias de restauración y manejo ecológico regional

AGRADECIMIENTOS/APOYOS (APARTADO OPCIONAL)

El vídeo proporciona una manera eficaz para ayudarle a demostrar el punto. Cuando haga clic en Vídeo en línea, puede pegar el código para insertar del vídeo que desea agregar. También puede escribir una palabra clave para buscar en línea el vídeo que mejor se adapte a su documento.

REFERENCIAS

Allen, C. D., Breshears, D. D., & McDowell, N. G. (2015). On underestimation of global vulnerability to tree mortality and forest die-off from hotter drought in the Anthropocene. *Ecosphere*, 6(8), 1–55. <https://doi.org/10.1890/ES15-00203.1>

Benzing, D. H. (2000). *Bromeliaceae: Profile of an adaptive radiation*. Cambridge University Press.

Cascante-Marín, A., Ramírez, S., & Aguilar, G. (2018). Reproductive strategies of epiphytic bromeliads under environmental stress. *Journal of Tropical Ecology*, 34(5), 365–376. <https://doi.org/10.1017/S0266467418000297>

Cervantes-Sánchez, J., López, R., & Moreno, J. (2019). Bioindicadores atmosféricos: respuesta fisiológica de *Tillandsia recurvata* a contaminantes industriales. *Revista Mexicana de Ciencias Ambientales*, 10(3), 45–58.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2022). Diagnóstico de la cuenca del río Tula y sus problemáticas ambientales. Gobierno de México.

Comisión nacional del Agua (CONAGUA) (2025). *Informe climático mensual 2025*

Chaves, C., & Rossini, A. (2019). Ecophysiological plasticity of atmospheric bromeliads under urban pollution. *Environmental Botany*, 160, 90–98. <https://doi.org/10.1016/j.envbot.2019.01.008>

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (2020). Informe de la calidad del aire en México 2020. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Díaz, L., & Moreno, C. (2019). Cambios fenológicos en bromelias epífitas bajo condiciones de estrés ambiental. *Revista Mexicana de Botánica*, 106(2), 45–59.

Espejo-Serna, A., López-Ferrari, A. R., & Ramírez-Morillo, I. M. (2017). Diversidad y ecología de las Bromeliaceae en ecosistemas semiáridos de México. *Acta Botánica Mexicana*, 120, 33–58.

García, E. (2004). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (5^a ed.). Instituto de Geografía, UNAM.

García, M., & Vázquez, J. (2021). Impacto ambiental de la expansión industrial en el Valle de Tula, Hidalgo. *Revista Mexicana de Ciencias Ambientales*, 12(2), 45–59.

Gómez-Meléndez, M., Ortega, R., & López, A. (2021). Respuestas ecofisiológicas de *Tillandsia recurvata* ante la contaminación atmosférica en ambientes semiáridos. *Ecología Aplicada*, 20(1), 33–47.

López-Hernández, M., Torres, G., & Roldán, D. (2021). Atmospheric nitrogen deposition enhances growth of *Tillandsia recurvata* in urban-industrial areas of central Mexico. *Environmental Pollution*, 290, 118061. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118061>

Martínez-Sánchez, J., Juárez, L., & Pérez, M. (2022). Impacto ecológico de la proliferación de *Tillandsia recurvata* sobre comunidades arbóreas urbanas. *Revista Latinoamericana de Ecología Urbana*, 15(2), 22–38.

Peñuelas, J., Sardans, J., & Estiarte, M. (2017). Climate change and plant ecophysiology: advances and future directions. *Global Change Biology*, 23(1), 17–24. <https://doi.org/10.1111/gcb.13361>

Rebollo-Vargas, M., Rodríguez, E., & Castañeda, L. (2020). Efecto alelopático de *Tillandsia recurvata* sobre especies arbóreas hospedantes en ambientes semiáridos. *Acta Botánica Mexicana*, 127, e1685.

Rzedowski, J. (2006). Vegetación de México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO).

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2022). Informe nacional sobre la calidad del aire 2022. Gobierno de México.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2023). Programa de restauración ecológica de la cuenca de la Presa Endhó, Hidalgo. Gobierno de México.

Sosa, R., Ávila, J., & Rentería, A. (2022). Emisiones industriales y su relación con contaminantes atmosféricos en el corredor Tula-Tepeji, Hidalgo. *Ingeniería Ambiental*, 28(3), 87–102.

Zepeda, C., Morales, D., & Ramírez, P. (2023). Efectos del cambio climático sobre epífitas en zonas áridas de México. *Acta Botánica Mexicana*, 130(2), 55–72.

Pérez-Hernández, C., González, M. E., & Flores, J. (2020). Efectos del estrés oxidativo en la reproducción de plantas epífitas. *Ecología Aplicada*, 19(3), 87–98.

Pérez-Noyola, J. L., Pérez-Escobar, O. A., Martínez-Camacho, J. L., & Salazar-Rojas, V. (2020). Vivipary in *Tillandsia recurvata* (Bromeliaceae): a rare case of true viviparity in epiphytes. *Botany Letters*, 167(1), 109–115. <https://doi.org/10.1080/23818107.2020.1729306>