

Ciencia Latina
Internacional

Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), enero-febrero 2024,
Volumen 8, Número 1.

DOI de la Revista: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i1

ESTIMACIÓN DE MICROPLÁSTICOS EN LA ATMOSFERA UTILIZANDO DINAMICA DE SISTEMAS

**ESTIMATION OF MICROPLASTICS IN THE ATMOSPHERE
USING SYSTEM DYNAMICS**

Marlon David Pérez Moreno

Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador

Marilyn Mishell Remache Taipe

Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador

Juan Gabriel Mollocana Lara

Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador

DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i1.10370

Estimación de Microplásticos en la Atmosfera Utilizando Dinamica de Sistemas

Marlon David Pérez Moreno¹

marlonperez318@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0002-8936-5112>

Carrera de Ingeniería Ambiental
Universidad Politécnica Salesiana
Quito, Ecuador

Marilyn Mishell Remache Taipe

tmeshell@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0002-9406-4883>

Carrera de Ingeniería Ambiental
Universidad Politécnica Salesiana
Quito, Ecuador

Juan Gabriel Mollocana Lara

jmollocana@ups.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-2430-8400>

Grupo de Investigación Ambiental en el
Desarrollo Sustentable GIADES
Ingeniería Ambiental
Universidad Politécnica Salesiana
Quito, Ecuador

RESUMEN

La dinámica de sistemas se utiliza para abordar el problema de los microplásticos en la atmósfera y sus efectos para el medio ambiente. Este enfoque implica la creación de un sistema que tenga en cuenta interacciones entre la deposición atmosférica, la retención de musgo y los impactos en el páramo. Se identifican factores como la absorción de microplásticos y la concentración de estas partículas en la atmósfera. Los hallazgos abarcan varios escenarios, que van desde las condiciones iniciales hasta mejoras en la capacidad de retención, la sensibilidad de los páramos, la dispersión de microplásticos y la consecución de una tasa de absorción del 90% por parte del musgo. Estos resultados subrayan el papel vital en la mitigación de la contaminación del aire. La utilización de la dinámica de sistemas se demuestra como un instrumento eficaz para comprender la intrincada dinámica entre la deposición atmosférica y su acumulación. Al modelar variables y relaciones esenciales, este enfoque holístico no solo ayuda a determinar la cantidad y composición de los microplásticos, sino que también permite proyectar posibles escenarios a largo plazo. Esta combinación de musgos y dinámica de sistemas se establece como una estrategia confiable para abordar el impacto ambiental de los microplásticos mediante el examen de la deposición atmosférica.

Palabras clave: MP, deposición, dinamica de sistemas

¹ Autor principal

Correspondencia: mperezm7@est.ups.edu.ec

Estimation of Microplastics in the Atmosphere Using System Dynamics

ABSTRACT

System dynamics is used to address the problem of microplastics in the atmosphere and its effects on the environment. This approach involves creating a system that takes into account interactions between atmospheric deposition, moss retention and impacts on the moor. Factors such as the absorption of microplastics and the concentration of these particles in the atmosphere are identified. The findings cover several scenarios, ranging from initial conditions to improvements in retention capacity, moor sensitivity, dispersion of microplastics and achieving a 90% absorption rate by moss. These results underline the vital role in mitigating air pollution. The use of system dynamics is demonstrated as an effective instrument to understand the intricate dynamics between atmospheric deposition and its accumulation. By modeling essential variables and relationships, this holistic approach not only helps determine the quantity and composition of microplastics, but also allows projecting possible long-term scenarios. This combination of mosses and system dynamics is established as a reliable strategy to address the environmental impact of microplastics by examining atmospheric deposition.

Keywords: MP;deposition, dynamic of systems

Artículo recibido 20 enero 2024

Aceptado para publicación: 25 febrero 2024



INTRODUCCIÓN

Los depósitos de microplásticos en la atmósfera son una amenaza para el medio ambiente. Utilizando la dinámica de sistemas, este estudio se centra en la dinámica de sistemas, para comprender las complejas interacciones entre la atmósfera y los microplásticos. Este enfoque intenta contribuir a estrategias de gestión eficaces modelando las interrelaciones y sus consecuencias. Bergman et al. (2019) y Huerta Lwanga et al. (2017) defienden la relevancia de este enfoque para comprender y reducir la contaminación por microplásticos. Se ha descubierto que los microplásticos, provenientes de envases desechados y botellas de agua, atraviesan la atmósfera en todos los continentes. Aunque una proporción significativa de los desechos plásticos se vierte en vertederos, se incineran o se reciclan, se estima que aproximadamente el 60% de los plásticos fabricados a nivel mundial ya han quedado depositados en el medio ambiente (UNEP Beat Plastic Pollution, s.f.).

Los musgos, se han utilizado ampliamente para evaluar la deposición de microplásticos en la atmósfera. Estos suelen crear esteras expansivas con grandes superficies, lo que les permite absorber los microplásticos del aire. (Berg et al., 1995). La práctica de utilizar musgo como bioindicador ganó popularidad a finales de la década de 1960 tras estudios que demostraron la capacidad de *Hylocomium splendens* para acumular y retener metales procedentes de la deposición atmosférica. Diversos estudios realizados por, Schintu et al. (2005), Aceto et al. (2003) y Huerta Lwanga et al. (2017), apoyan la relevancia de los musgos como bioindicadores y destacan su capacidad para acumular microplásticos, convirtiéndolos en una herramienta útil para evaluar la deposición atmosférica.

El gran alcance de este ha generado preocupaciones con respecto a su impacto potencial tanto en la salud humana como en la biodiversidad. Los páramos, un ecosistema delicado y exclusivo, son altamente susceptibles a la contaminación del aire debido a la ausencia de vegetación adecuada y la presencia de fuertes vientos que pueden transportar contaminantes a grandes distancias (Lebreton et al., 2019; Routti et al., 2019). La presencia de microplásticos, un contaminante cada vez más analizado, representa una amenaza importante tanto para el medio ambiente como para la salud humana ya que pueden acumularse en altas concentraciones, lo que se ha convertido en un desafío global crítico (Iniguez et al., 2018).

La creciente preocupación por la deposición atmosférica de microplásticos, ha impulsado

investigaciones para comprender y abordar este fenómeno. Partiendo así de las contribuciones teóricas de Sterman, J. (2000) la cual, menciona que la utilización de modelos de dinámica de sistemas para estudiar la deposición atmosférica de microplásticos, tiene como objetivo comprender la interacción entre varios elementos dentro de un sistema ambiental. En este marco, se identifican factores, como la concentración de microplásticos en el aire, la capacidad de absorción y condiciones ambientales como las precipitaciones y la velocidad del viento. Este enfoque holístico no solo busca cuantificar la presencia de microplásticos, sino también comprender los procesos subyacentes que determinan su distribución y impacto. Investigadores como Bergmann et al. (2019) han subrayado la importancia de abordar la contaminación por microplásticos en distintos entornos, destacando la necesidad de estrategias de gestión basadas en la comprensión profunda de la dinámica de sistemas, debido a que proporciona un marco conceptual que permite la recopilación de datos empíricos, así como la comprensión de las relaciones causales entre diferentes variables. Al modelar la deposición atmosférica de microplásticos, pretendemos no sólo cuantificar la presencia de estos contaminantes, sino también comprender los procesos subyacentes que determinan su distribución y acumulación. En este contexto, la aplicación de la dinámica de sistemas destaca como una valiosa herramienta analítica para estudiar las complejas interacciones entre los microplásticos y el entorno atmosférico, en las regiones de páramo. El objetivo de esta investigación es considerar las relaciones causales y las variables, proporcionando una imagen más completa y dinámica de la interacción de los elementos del sistema a lo largo del tiempo. Cuando se trata de contaminación por microplásticos, la dinámica de sistemas facilita modelar escenarios, identificar patrones emergentes y comprender las consecuencias a largo plazo. Al modelar la deposición atmosférica de microplásticos en regiones de páramo, este enfoque pretende no sólo cuantificar la presencia de contaminantes, sino también comprender los procesos subyacentes que determinan su distribución y acumulación.

METODOLOGÍA

Se desarrollara un modelo de dinámica de sistemas para simular la deposición atmosférica de microplásticos. Utilizamos la metodología propuesta por Forrester (1961) y aplicamos la dinámica de sistemas a situaciones específicas para identificar factores como la concentración de microplásticos en la atmósfera. Se incorporan ecuaciones diferenciales para modelar las interacciones complejas entre

estas variables.

El enfoque de dinámica de sistemas se utiliza para transformar conceptualmente las relaciones entre las variables definidas en ecuaciones matemáticas. De las cuales se establecen relaciones causales y se integran tendencias temporales para mostrar cómo las tasas de deposición atmosférica afectan la cantidad de microplásticos acumulados en los musgos a lo largo del tiempo.

Plantamiento del Diagrama Causal

Definición del Sistema: El sistema se definió centrándose en la creación de indicadores de aire con microplásticos. La fuerza de las interacciones de estas determina la complejidad del sistema, y la absorción de microplásticos que está relacionada con el medio ambiente y las actividades humanas.

Identificación de Variables fuentes y rutas: Para modelar la deposición atmosférica de microplásticos significa identificar con precisión los componentes clave del sistema. Estas variables importantes incluyen microplásticos en la atmósfera, generación de residuos, cantidad de automóviles, población, los cuales proporcionan puntos por donde los microplásticos ingresan a la atmósfera. Cada una de estas variables juega un papel fundamental en generación de la dinámica del sistema. Esto se debe a que las interacciones entre las variables determinan la absorción, acumulación y distribución de los microplásticos.

Parametrización del Modelo: Este paso implica asignar valores iniciales mediante estimaciones como también constantes a las variables del modelo.

Desarrollo del Modelo: Se han formulado ecuaciones que muestran la tasa de cambio de variables clave, como los microplásticos en la atmósfera, generación de residuos, crecimiento de la población, cantidad de automóviles que describen la dinámica del sistema a lo largo del tiempo. El cual se ha desarrollado un diagrama causal, en respuesta a las concentraciones atmosféricas.

Simulación: Se establece un modelo basado en el diagrama de Forrester mediante la recopilación de variables importantes sobre el patrón causal y las fuentes de deposición atmosférica.

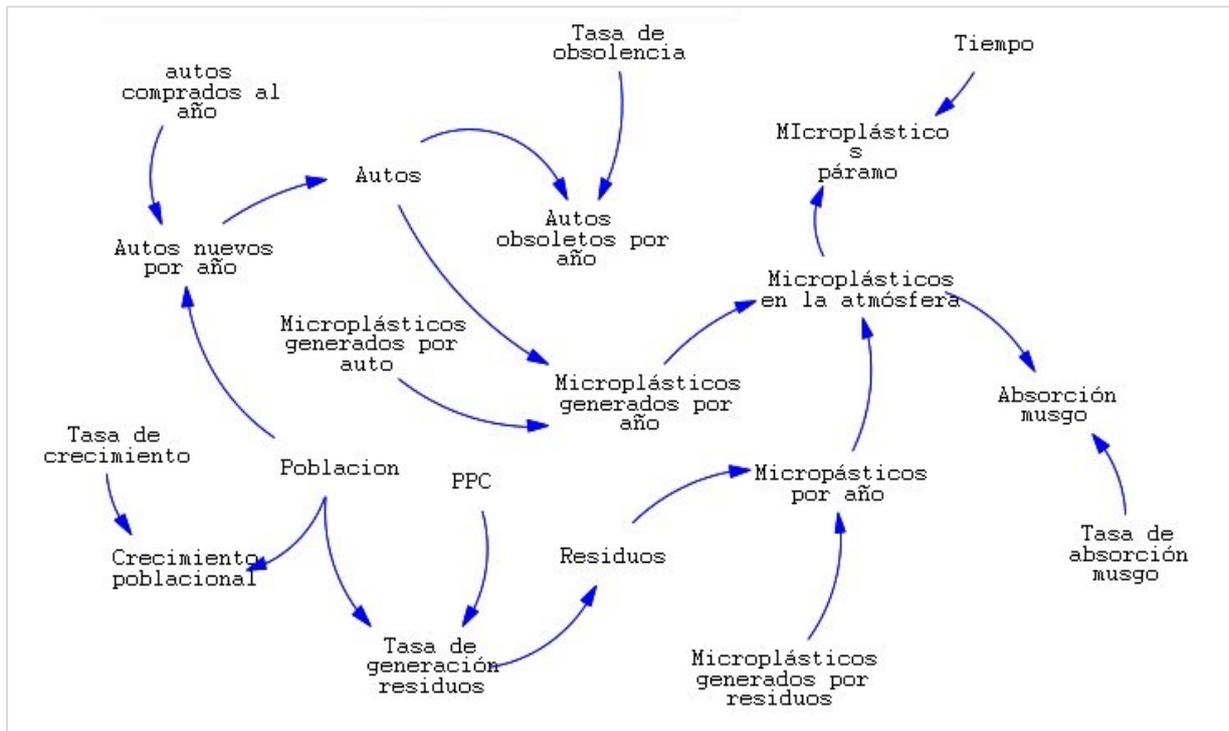
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Plantamiento del Diagrama Causal

Se incluye interacciones fundamentales entre las emisiones de los vehículos, la generación de residuos y la población en relación con la contaminación por microplásticos.

Se establecieron relaciones entre estas variables para comprender cómo las actividades humanas influyen en la liberación de microplásticos al medio ambiente. Los factores más importantes para la modelización son las emisiones atmosféricas de microplásticos son el número de vehiculos en circulación y los residuos producidos por la población. Además, el impacto de la población es considerado un factor que determina la generación de residuos y, en consecuencia, la distribución de microplásticos en el ambiente del páramo.

Ilustración 1 Diagrama Causal Del Modelo De Estimación de Microplásticos en la Atmosfera Utilizando Dinamica de Sistemas



Fuente: Aurores elaborado en Vensim.

Donde:

Tabla 1 Estructura detallada para comprender cómo la pueden contribuir a la acumulación de microplásticos en la atmósfera y en el musgo en áreas de páramo,

Generación De Residuos	Refiere a la cantidad total de residuos generados en el área de estudio. Esta cantidad se obtiene multiplicando la tasa de generación de residuos por la población.
Automóviles	Es una constante que representa el número fijo de coches en la zona de estudio y está directamente relacionada con Microplásticos Atmósfera
Población	Refiere al número de habitantes del área. Los cambios a lo largo del tiempo están impulsados por la tasa de crecimiento poblacional
Microplásticos Atmósfera Microplásticos Musgo Microplásticos en el Páramo	Son reservorios que acumulan la cantidad total de microplásticos en la atmósfera, páramo y musgo, respectivamente.
Tasa Absorción Musgo	Los flujos muestran la tasa de cambio de los microplásticos en la atmósfera y el musgo respectivamente.
Capacidad De Retención Musgo	Representa la capacidad del musgo para absorber microplásticos del aire

Fuente: Aurores

Parametrización del Modelo

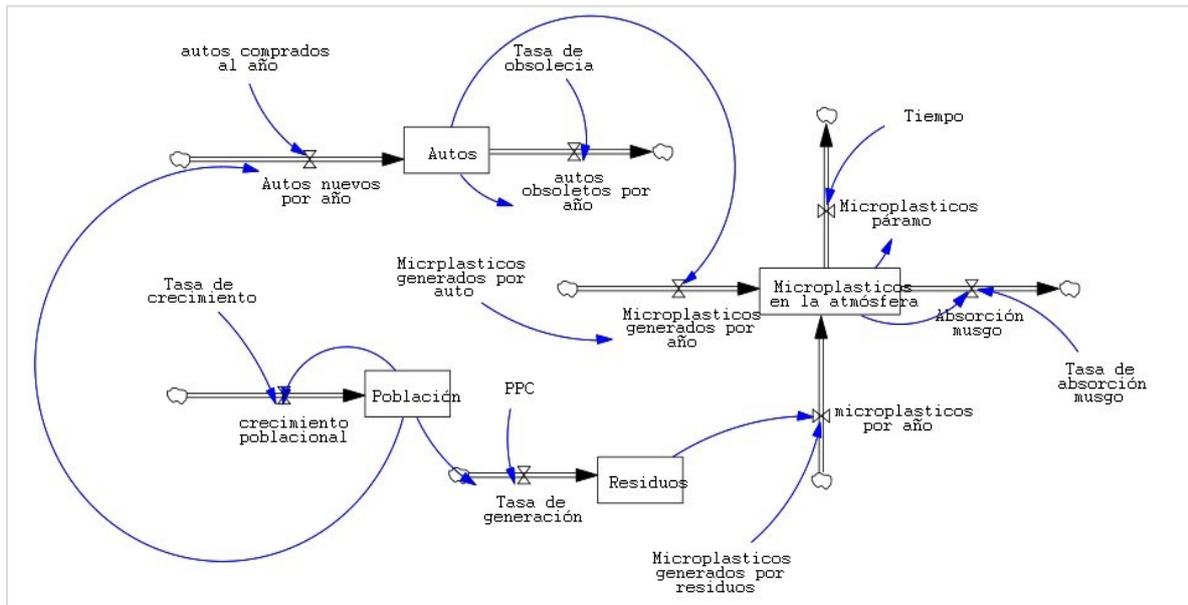
Se llevaron a cabo cuatro escenarios para evaluar la dinámica de la contaminación por microplásticos en el páramo. La situación inicial son estimaciones y representa una comunidad con 1000 habitantes, una generación de residuos de 0,5 toneladas al año y una concentración de microplásticos en el aire de 5.000 partículas. En el segundo escenario, probamos la capacidad del musgo para retener microplásticos. El tercer escenario demuestra la sensibilidad del páramo frente a la propagación de los microplásticos a este ecosistema frágil. Este último escenario propuso mejorar la tasa de absorción del musgo hasta en un 90%, proporcionando una estrategia de mitigación eficaz. Estos escenarios resaltan la complejidad de la interacción entre el crecimiento de la población humana, la generación de residuos, los automóviles y el potencial de los musgos como bioindicadores.

Desarrollo del Modelo



Como se muestra en la ilustración 2. El diagrama de Forrester muestra un marco para comprender cómo la producción de residuos, la cantidad de automóviles, la población y las interacciones entre los microplásticos y los musgos contribuyen a la acumulación de estos en la atmósfera y los musgos de los páramos.

Ilustración 2 Diagrama de Forrester Del Modelo De Estimación de Microplásticos en la Atmosfera Utilizando Dinamica de Sistemas



Fuente: Aurores elaborado en Vensim.

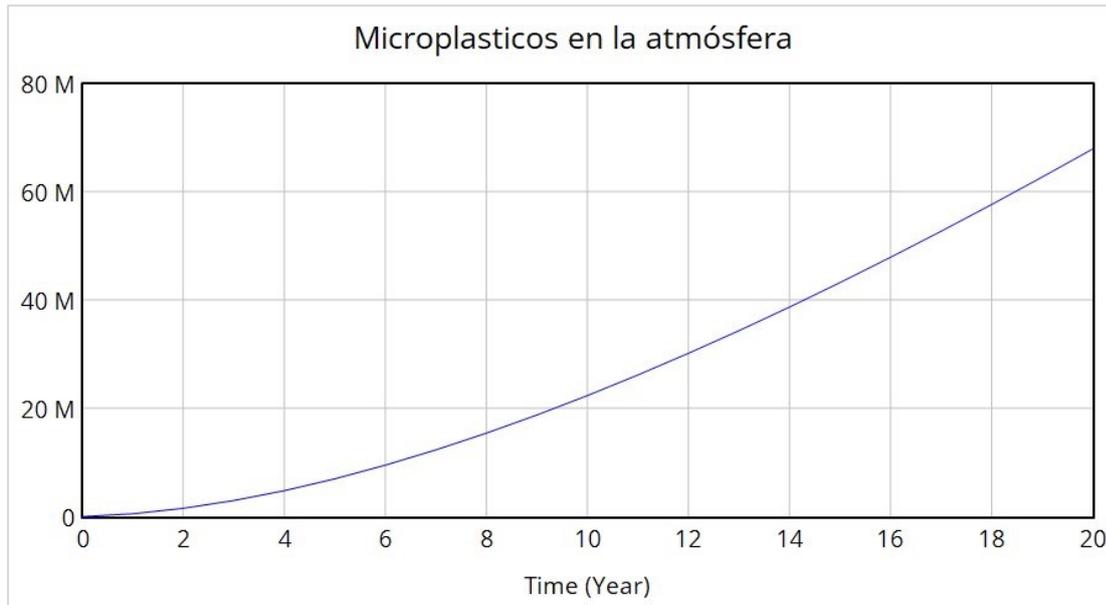
Las condiciones climáticas se mantienen constantes para las simulaciones, pero es posible que los estudios futuros quieran considerar el cambio climático, ya que las distribuciones pueden volverse mayores o menores debido al cambio climático. Por ejemplo, la tasa de propagación de los microplásticos se ralentiza durante la estación seca, cuando hay menos viento, lo que significa que permanecen en el aire más tiempo que en la temporada de lluvias, y hay más vientos que aceleran la propagación.

Simulación

Condición inicial Escenario 1: Existen tendencias alarmantes en la contaminación por microplásticos que resaltan las interacciones del ecosistema de páramo a lo largo del tiempo. Además, como se muestra en la Ilustración 3, las concentraciones atmosféricas de microplásticos están aumentando constantemente. La llegada de microplásticos al páramo puede tener consecuencias únicas, impactando la biodiversidad. La combinación de estas dos dinámicas resalta la vulnerabilidad del ecosistema de

páramo al creciente problema de la contaminación por microplásticos. La delicada relación entre el musgo y los microplásticos en la naturaleza refleja un desequilibrio en la capacidad de absorción natural del musgo. Esta situación puede causar una serie de efectos adversos, impactando negativamente la función del páramo como regulador de agua y hábitat de especies únicas.

Ilustración 3 Microplásticos en la atmósfera



Fuente: Autores elaborado en Vensim.

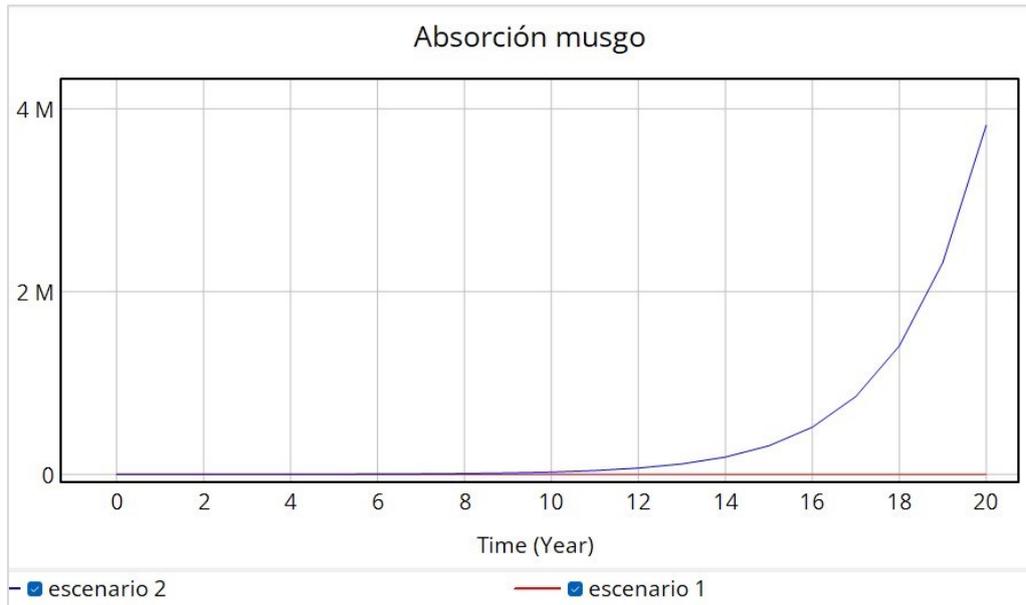
Por eso este escenario no solo proporciona el punto de partida para la simulación, sino que también establece las bases para comparar y evaluar los efectos de los cambios en los escenarios subsiguientes (Escenario 2, Escenario 3, Escenario 4). Cualquier modificación en las variables y parámetros después de este punto se considera una intervención o modificación en relación con la situación inicial, ofreciendo así una perspectiva esencial para comprender y abordar la problemática de la contaminación por microplásticos en el páramo.

Escenario 2: Mejora en la Capacidad de Retención: Se presenta como una oportunidad única para analizar de cerca cómo la capacidad de absorción del musgo puede influir en las concentraciones atmosféricas de microplásticos y, por consiguiente, en su llegada al ecosistema de páramo. Al introducir una tasa de absorción del musgo distinta de cero, nos adentramos en un análisis crítico sobre el impacto potencial de esta especie en la reducción de microplásticos en el aire.

Una tasa de absorción más elevada implica una mayor eficacia del musgo para capturar partículas de microplásticos presentes en el aire. Este proceso contribuye a la disminución de las concentraciones

atmosféricas, ya que el musgo actúa como un componente clave en la remoción de microplásticos del entorno, ofreciendo así una solución potencial para mitigar los efectos negativos de la contaminación por microplásticos. Este aspecto es crucial para comprender el papel específico que el musgo podría desempeñar en la mejora de la calidad del aire y la protección del ecosistema de páramo.

Ilustración 4 Microplásticos en el musgo



Fuente: Autores elaborado en Vensim.

Escenario 3: Sensibilidad del páramo frente a la propagación de los microplásticos: La adsorción del musgo se presenta como un factor clave, a medida que el musgo absorbe microplásticos, se reduce la cantidad de estas partículas que llegan al páramo, lo que puede tener beneficios significativos para la biodiversidad y la salud del ecosistema. La capacidad del musgo para actuar como un regulador natural se vuelve evidente en la medida en que disminuye la presencia de microplásticos en el páramo.

Esta dinámica también destaca la importancia de considerar la variabilidad en la propagación de microplásticos a través del tiempo. Si bien las concentraciones atmosféricas pueden aumentar debido a diversas actividades humanas, la capacidad de absorción del musgo sugiere que el ecosistema tiene la capacidad de mitigar algunos de los efectos adversos, al menos en la escala del páramo. La disminución de microplásticos en el páramo a lo largo del tiempo es un indicativo positivo de la capacidad del musgo para adaptarse y responder a la contaminación.

Ilustración 5 Absorción del musgo

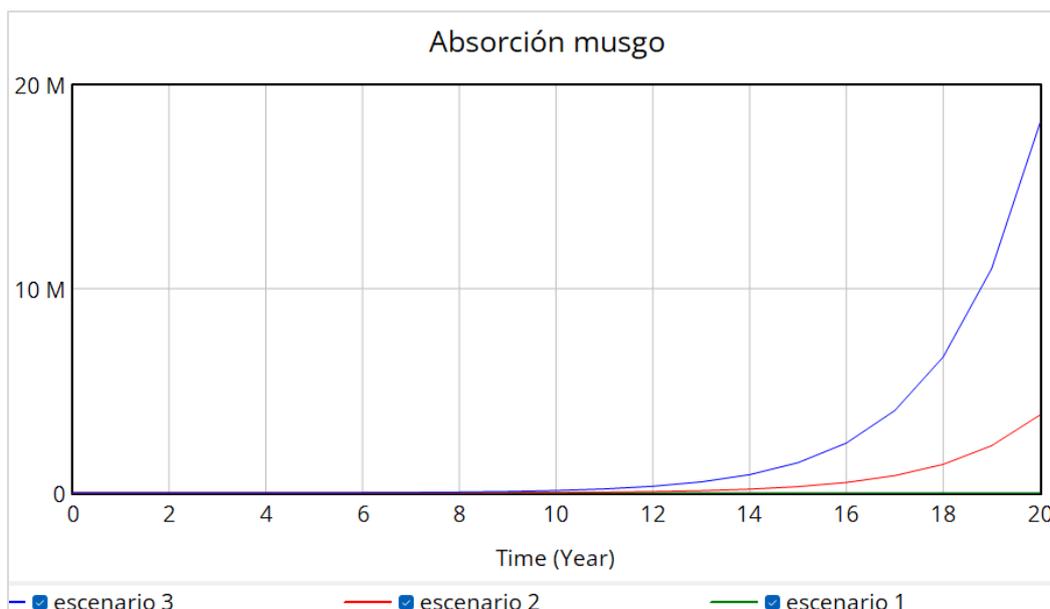
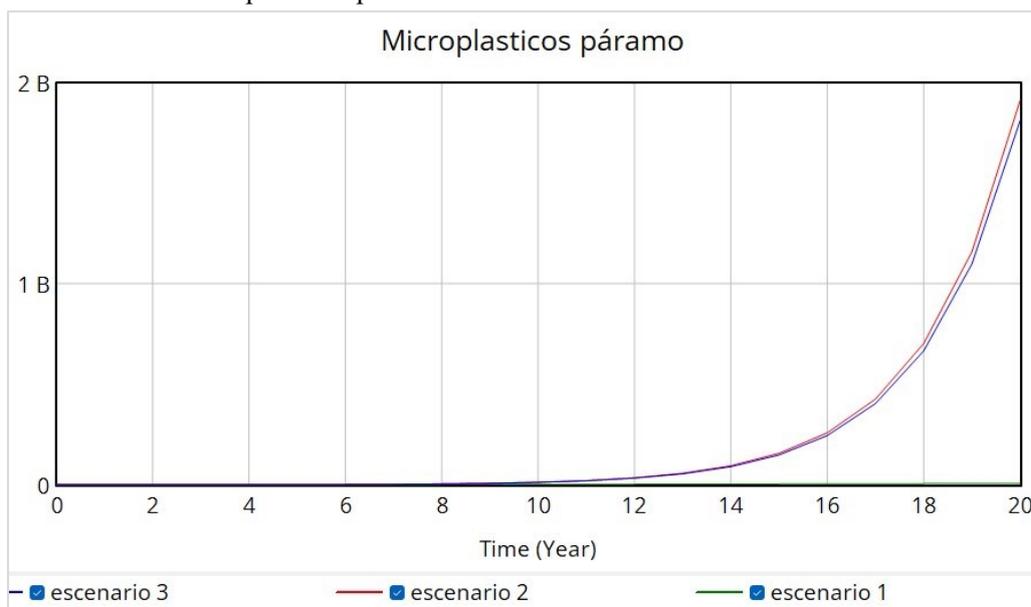


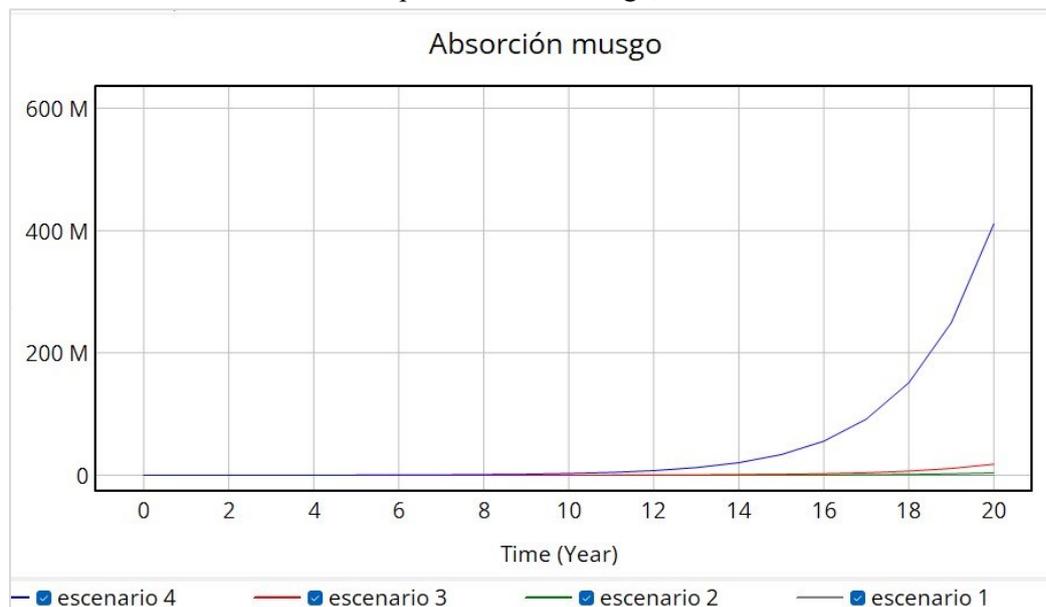
Ilustración 6 Microplásticos páramo



Escenario 4: Tasa de absorción del musgo hasta en un 90%: En la Ilustración 8, se observa que más microplásticos pueden llegar al musgo y que la mejora de la capacidad de almacenamiento es un factor clave para reducir la contaminación por microplásticos en general en este componente específico del ecosistema. Optimizar la conservación de los musgos el potencial positivo no solo de reducir la acumulación de microplásticos en los indicadores biológicos, sino también de reducir la carga general de microplásticos en el medio ambiente y en el páramo, ayudando a mantener la salud ambiental y la estabilidad del ecosistema. Este escenario resalta la importancia de considerar estrategias específicas para aumentar la capacidad natural de los bioindicadores en el control de la contaminación por

microplásticos.

Ilustración 7 Escenario 4 Microplásticos en el musgo, Fuente: Autores elaborado en Vensim



CONCLUSIONES

Utilizando modelos de dinámica de sistemas, se desarrolló un modelo de simulación integral para abordar la deposición atmosférica de microplásticos utilizando el musgo como un importante bioindicador. Este enfoque integra, la interacción entre variables tradicionales como la producción de residuos y la movilidad de vehículos, y la capacidad de almacenar microplásticos en la biomasa de musgo.

Condiciones Iniciales Escenario 1: La dinámica de sistemas permite visualizar cambios temporales en la contaminación, mostrando que la relación entre la generación de residuos, la movilidad de los vehículos y la capacidad de retención de microplásticos del musgo evoluciona dinámicamente. Esta perspectiva temporal proporciona una comprensión más completa de los cambios de los ecosistemas a lo largo del tiempo.

Escenario 2: Mejora en la Capacidad de Retención del Musgo: Se destaca la importancia significativa de la capacidad de absorción del musgo como un elemento clave en la mitigación de la contaminación por microplásticos en el ecosistema de páramo. Al introducir una tasa de absorción del musgo diferente de cero, se evidencia la capacidad potencial de esta especie para influir directamente en las concentraciones atmosféricas de microplásticos y, por ende, en su impacto en el páramo.

La observación de una tasa de absorción más elevada revela que el musgo, al actuar como un filtro natural, incrementa su eficacia para capturar partículas de microplásticos presentes en el aire. Este proceso se traduce directamente en la disminución de las concentraciones atmosféricas, subrayando el papel esencial del musgo como componente clave en la eliminación activa de microplásticos del entorno.

La capacidad del musgo para reducir las concentraciones de microplásticos en el aire no solo tiene implicaciones para la calidad del aire, sino que también sugiere que esta especie podría desempeñar un papel crucial en la protección general del ecosistema de páramo contra los impactos negativos de la contaminación por microplásticos.

Escenario 3: Sensibilidad del páramo frente a la propagación de los microplásticos: La capacidad del musgo para actuar como un regulador natural se manifiesta claramente al considerar cómo su actividad de absorción impacta directamente en la cantidad de microplásticos que llegan al páramo. Este papel regulatorio es esencial para mantener el equilibrio en el ecosistema y preservar la integridad de sus componentes biológicos y geofísicos.

La dinámica observada también resalta la relevancia de considerar la variabilidad temporal en la propagación de microplásticos. Aunque las concentraciones atmosféricas pueden aumentar debido a diversas actividades humanas, la capacidad adaptativa del musgo para absorber estos contaminantes sugiere que el ecosistema del páramo tiene la capacidad intrínseca de contrarrestar algunos de los efectos negativos asociados con la contaminación por microplásticos.

La disminución progresiva de microplásticos en el páramo a lo largo del tiempo constituye un indicador positivo de la capacidad de adaptación y respuesta del musgo frente a la contaminación. Este fenómeno subraya la resiliencia del ecosistema y resalta la importancia de considerar no solo las condiciones actuales, sino también la capacidad de adaptación a lo largo del tiempo al diseñar estrategias de conservación y mitigación de impactos ambientales. En conjunto, el Escenario 3 sugiere que el musgo, al actuar como un defensor natural, desempeña un papel crucial en la sostenibilidad y preservación del delicado ecosistema del páramo frente a la creciente amenaza de la contaminación por microplásticos.

Escenario 4 Mejora en la capacidad de retención del musgo: Al aplicar la dinámica del sistema al cuarto escenario, queda claro cómo la capacidad mejorada de retención del musgo actúa como un factor

dinámico importante para limitar la contaminación. La mayor capacidad de los musgos para almacenar microplásticos tiene un impacto dinámico en la carga total del ecosistema, lo que demuestra la efectividad de las estrategias para mejorar la capacidad natural del bioindicador.

Este enfoque de dinámica de sistemas proporciona una comprensión más profunda de cómo las variables evolucionan interactivamente con el tiempo al paso de los días. La adopción de esta perspectiva considera la dinámica temporal de los microplásticos durante la deposición atmosférica y destaca la necesidad de políticas ambientales y estrategias de gestión adaptativas. Este modelo dinámico mejora la comprensión de los impactos a largo plazo y enfatiza la importancia de un enfoque holístico para la gestión de la contaminación.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Aceto, M., Abollino, O., Conca, R., Malandrino, M., Mentasti, E., & Sarzanini, C. (2003). The use of mosses as environmental metal pollution indicators. *Chemosphere*, 50(3), 333–342.

[https://doi.org/10.1016/s0045-6535\(02\)00533-7](https://doi.org/10.1016/s0045-6535(02)00533-7)

Afsar, B., Elsurer Afsar, R., Kanbay, A., Covic, A., Ortiz, A., & Kanbay, M. (2019). Air pollution and kidney disease: review of current evidence. *Clinical Kidney Journal*, 12(1), 19–32.

<https://doi.org/10.1093/ckj/sfy111>

Berg, T., Røyset, O., & Steinnes, E. (1995). Moss (*Hylocomium splendens*) used as biomonitor of atmospheric trace element deposition: Estimation of uptake efficiencies. *Atmospheric Environment* (Oxford, England: 1994), 29(3), 353–360.

[https://doi.org/10.1016/1352-2310\(94\)00259-n](https://doi.org/10.1016/1352-2310(94)00259-n)

Bergmann, M., Mützel, S., Primpke, S., Tekman, M. B., Trachsel, J., & Gerdt, G. (2019). White and wonderful? Microplastics prevail in snow from the Alps to the Arctic. *Science Advances*, 5(8).

<https://doi.org/10.1126/sciadv.aax1157>

Camargo Rodríguez, S., Franco López, J. A., Chud Pantoja, V. L., & Osorio Gómez, J. C. (2017). Modelo de simulación dinámica para evaluar el impacto ambiental de la producción y logística inversa de las llantas. *Edu.co*. <https://doi.org/10.14482/inde.35.2.10165>

Camargo Rodríguez, S., Universidad del Valle, Franco López, J. A., Chud Pantoja, V. L., Osorio Gómez, J. C., Universidad del Valle, Universidad Santiago de Cali, & Universidad del Valle.



- (2017). Dynamic simulation model to evaluate the environmental impact of production and reverse logistics of tire. *Ingeniería y Desarrollo*, 35(2), 357–381.
<https://doi.org/10.14482/inde.35.2.10165>
- Forrester, J. W. (1961). *Industrial Dynamics*. Laprospective.fr.
http://www.laprospective.fr/dyn/francais/memoire/autres_textes_de_la_prospective/autres_ouvrages_numerises/industrial-dynamics-forrester-1961.pdf
- Halleraker, J. H., Reimann, C., de Caritat, P., Finne, T. E., Kashulina, G., Niskaavaara, H., & Bogatyrev, I. (1998). Reliability of moss (*Hylocomium splendens* and *Pleurozium schreberi*) as a bioindicator of atmospheric chemistry in the Barents region: Interspecies and field duplicate variability. *The Science of the Total Environment*, 218(2–3), 123–139.
[https://doi.org/10.1016/s0048-9697\(98\)00205-8](https://doi.org/10.1016/s0048-9697(98)00205-8)
- Huerta Lwanga, E., Mendoza Vega, J., Ku Quej, V., Chi, J. de L. A., Sanchez del Cid, L., Chi, C., Escalona Segura, G., Gertsen, H., Salánki, T., van der Ploeg, M., Koelmans, A. A., & Geissen, V. (2017). Field evidence for transfer of plastic debris along a terrestrial food chain. *Scientific Reports*, 7(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-017-14588-2>
- Íñiguez, M. E., Conesa, J. A., & Fullana, A. (2018). Recyclability of four types of plastics exposed to UV irradiation in a marine environment. *Waste Management (New York, N.Y.)*, 79, 339–345.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.08.006>
- Lebreton, L., Egger, M., & Slat, B. (2019). A global mass budget for positively buoyant macroplastic debris in the ocean. *Scientific Reports*, 9(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-49413-5>
- Moreno Moreno, N. I. (2018). *DINÁMICA DE SISTEMAS Y LA CURVA MEDIO AMBIENTAL DE KUZNETS EN PERÚ (1990-2015)*. Researchgate.net.
<https://doi.org/10.22395/SEEC.V21N49A3>
- Peng, J., Wang, J., & Cai, L. (2017). Current understanding of microplastics in the environment: Occurrence, fate, risks, and what we should do. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 13(3), 476–482. <https://doi.org/10.1002/ieam.1912>
- Perevochtchikova, M. (2013). La evaluación del impacto ambiental y la importancia de los indicadores ambientales. *Gestión y política pública*, 22(2), 283–312.

https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-10792013000200001

Pivokonsky, M., Cermakova, L., Novotna, K., Peer, P., Cajthaml, T., & Janda, V. (2018). Occurrence of microplastics in raw and treated drinking water. *The Science of the Total Environment*, 643, 1644–1651. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.102>

Roblin, B., & Aherne, J. (2020). Moss as a biomonitor for the atmospheric deposition of anthropogenic microfibres. *The Science of the Total Environment*, 715(136973), 136973. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136973>

Rodríguez, L. M., Lubo, C. M., Abadía, J., Orozco, Ó., López, A., & Llano, G. (2017). Comparación de los escenarios de emisiones de GEI por combustión móvil y fertilización en un cultivo de caña comercial y orgánica a través de modelos de simulación. *Producción + limpia*, 12(2), 80–91. <https://doi.org/10.22507/pml.v12n2a7>

Routti, H., Atwood, T. C., Bechshoft, T., Boltunov, A., Ciesielski, T. M., Desforges, J.-P., Dietz, R., Gabrielsen, G. W., Jenssen, B. M., Letcher, R. J., McKinney, M. A., Morris, A. D., Rigét, F. F., Sonne, C., Styriehave, B., & Tartu, S. (2019). State of knowledge on current exposure, fate and potential health effects of contaminants in polar bears from the circumpolar Arctic. *The Science of the Total Environment*, 664, 1063–1083. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.030>

Sánchez Céspedes, J. M., Gaona Barrera, A. E., & Dallos Parra, D. L. (2021). Modelo de Simulación Para Evaluación de Políticas Ambientales Mediante la Caracterización de la Contaminación del Aire en la Ciudad de Bogotá usando Dinámica de Sistemas. *Org.co*. <https://doi.org/10.25100/iyc.v24i2.11573>

Schintu, M., Cogoni, A., Durante, L., Cantaluppi, C., & Contu, A. (2005). Moss (*Bryum radiculosum*) as a bioindicator of trace metal deposition around an industrialised area in Sardinia (Italy). *Chemosphere*, 60(5), 610–618. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.01.050>

Streman, J. D. (2000). *Business Dynamics Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. Jimcontent.com. https://sa85c2e82e126a3ae.jimcontent.com/download/version/1360070105/module/6264585279/name/%E6%96%87%E5%AD%97BUSINESS_DYNAMICS.pdf

Valencia, A. P. (2014). Estudio de disminución de partículas atmosféricas contaminantes, mediante



envolventes térmicas. Dinamica-de-sistemas.com. Recuperado 29 de diciembre de 2023, de <http://www.dinamica-de-sistemas.com/revista/1214i-dinamica-de-sistemas.pdf>

Valencia-Rodríguez, O., Test, G. O., & Redondo, J. M. (2019). Metodología para el Modelado de algunos Aspectos Asociados a la Sostenibilidad Empresarial y su Aplicación en una Empresa Manufacturera. *CIT Informacion Tecnologica*, 30(4), 103–126.

<https://doi.org/10.4067/s0718-07642019000400103>

Visual feature. (s. f.). Unep.org. Recuperado 13 de diciembre de 2023, de

<https://www.unep.org/interactive/beat-plastic-pollution/>

Wright, S. L., Ulke, J., Font, A., Chan, K. L. A., & Kelly, F. J. (2020). Atmospheric microplastic deposition in an urban environment and an evaluation of transport. *Environment International*, 136(105411), 105411. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105411>

