



# Simulación mediante un Sistema Multiagente de la Evolución de un Contaminante Conservativo en Suelo por la Acción de un Productor Primario: Aplicación a una Propuesta de Fitorremediación Geométrica

## Simulation Using a Multi-Agent System of the Evolution of a Conservative Contaminant in Soil by the Action of a Primary Producer: Application to a Geometric Phytoremediation Proposal

Presentación: 29/03/2025

Aprobación: 29/05/2025

Publicación: 19/06/2025

### **Natalia C. Bustos**

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba, Argentina  
nataliacaruline@gmail.com

### **Claudia M. Sánchez**

 0000-0001-5965-4963

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba, Argentina  
Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Matemática, Astronomía, Física y Computación, Argentina  
csanchez@frc.utn.edu.ar  
claudia@famaf.unc.edu.ar

### **Javier Britch**

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba, Argentina  
javierbritch@hotmail.com

### **Resumen**

En este trabajo se presenta un modelo de Sistema Multiagentes donde se describen agentes “vegetación” en presencia de un contaminante en el suelo, con una distribución espacial inicial al azar homogénea en un hábitat representado por un territorio circular. Los agentes vegetación tienen tasas de crecimiento y senescencia lineales asociadas a reglas locales y globales. A partir de estas emerge un crecimiento neto de tipo sigmoide. Cada agente vegetación produce una semilla en una fase específica del ciclo, en función de reglas dependientes

de la densidad de cada agente. Los agentes están caracterizados por sus biomasa aérea y radicular reguladas por la relación alométrica raíz/parte aérea y se encuentran inicialmente distribuidos en parches al azar con una cierta densidad superficial de biomasa total, pudiendo de esta manera crecer, reducirse o inclusive desaparecer del hábitat. El modelo incorpora la competencia intraespecífica por los recursos, a través de la parte radicular. También se modela el ingreso del contaminante al agente vegetación desde la raíz y su acumulación. Por último, se analiza la relación entre la fase de producción de semillas y la optimización de un proceso de fitorremediación geométrica por extracción.

**Palabras clave:** Ecosistemas, Sistemas Multiagentes, Contaminación, Fitorremediación.

### Abstract

This work presents a Multi-Agent System model that describes "vegetation" agents in the presence of a contaminant, with an initial homogeneous random distribution within a habitat represented by a circular habitat. Vegetation agents exhibit linear growth and senescence rates governed by local and global rules, resulting in emergent sigmoid net growth. Each vegetation agent produces a seed during a specific phase of its life cycle, based on density-dependent rules for each agent. These agents are characterized by their aerial and root biomass, regulated by the root/aerial part allometric relationship. Initially distributed randomly in patches with a certain surface density of total biomass, agents can grow, shrink, or even disappear from the habitat. The model incorporates intraspecific competition for resources through the root system. The model also simulates the uptake of the contaminant by the vegetation agent through the roots, its distribution and accumulation. Finally, the relationship between the seed production phase and the optimization of a contaminant extraction-based phytoremediation process is analyzed.

**Keywords:** Ecosystems, Multi-Agent Systems, Contamination, Phytoremediation.

## I. Introducción

La presencia de metales pesados en suelos constituye un serio problema ambiental (Hermoso de Mendoza García et al., 2008). Muchos de estos metales son micronutrientes esenciales para plantas y animales (Coyago, E. y Bonilla, S., 2014; Rodríguez Eugenio et al., 2019), pero en concentraciones altas pueden causar toxicidad debido a su naturaleza no biodegradable. Una vez en el suelo, los metales pesados pueden quedar retenidos en el mismo, pero también pueden ser movilizados en la solución del suelo mediante diferentes mecanismos biológicos y químicos (Pagnanelli et al., 2004). La movilidad relativa de los elementos traza en suelos es de suma importancia en cuanto a su disponibilidad y su potencial para lixiviarse de los perfiles del suelo al agua subterránea (Yin et al., 2003). Algunos estudios han mostrado que el Si, Cu, Ni y Co presentan movilidad elevada; As, Sb, Mn y Fe, movilidad baja; Ba, muy baja; y Pb, Cd y Ag, prácticamente inmóviles (Collado Fernández, D., 2002). En general, los metales pesados incorporados al suelo pueden seguir varias vías diferentes (García, I. y Dorransoro, C., 2005). Entre estas, la absorción por las plantas es de especial interés, no solo porque puede permitir la incorporación de los contaminantes a la cadena trófica (Prieto Méndez et al., 2009), sino también porque constituye la base de estrategias de fitorremediación ambiental. La fitorremediación, una tecnología sostenible y económica,

utiliza plantas para extraer, estabilizar o degradar contaminantes en el suelo, incluyendo metales pesados. Por ejemplo, un estudio realizado en la localidad de Bouwer, Córdoba, Argentina (Salazar, J., 2014), donde la actividad de una fábrica de baterías generó una grave contaminación ambiental principalmente por plomo, analizó la aplicación de técnicas de fitorremediación en el tratamiento de suelos contaminados, basadas en la evaluación y empleo de especies de plantas nativas que crecen en la provincia de Córdoba. Las plantas han desarrollado mecanismos muy específicos y eficientes, como las raíces, para absorber, translocar y acumular nutrientes esenciales (Lasat, M., 2000); sin embargo, algunos metales y metaloides son absorbidos, translocados y acumulados debido a que presentan un comportamiento electroquímico similar a los elementos nutritivos esenciales (Souza et al., 2005). La fitotoxicidad ocasionada por altas concentraciones de metales pesados puede dar lugar a un crecimiento débil de las plantas, reducción en la captación de nutrientes, desórdenes metabólicos y estrés oxidativo. Este último afecta procesos clave como la fotosíntesis, la reproducción, la producción de clorofila, el metabolismo y la germinación de las semillas (Smith et al., 2010). No obstante, muchas plantas, especialmente las hiperacumuladoras, han desarrollado adaptaciones que les permiten tolerar altos niveles de contaminantes y, al mismo tiempo, contribuir a su remoción del suelo mediante estrategias de fitorremediación. Por lo tanto, una correcta descripción de la distribución de las raíces, su relación con la parte aérea a través de la relación alométrica raíz/parte aérea y de esta última, cuya dependencia específica con la densidad determina la producción de semillas, no solo ayuda a determinar la absorción de contaminantes y su posible incorporación a la cadena trófica, sino que también resulta crucial para el diseño y la optimización de estrategias de fitorremediación ambiental (Shah, V. y Daverey, A., 2020). Estas estrategias, basadas en procesos naturales, representan una herramienta fundamental para la mitigación de los impactos de la contaminación por metales pesados y la restauración de ecosistemas degradados.

## II. Metodología

Se elaboró un código en el entorno Matlab que simula un hábitat plano circular de radio  $R_h$  (radio de hábitat) donde se encuentran agentes vegetación que pueden interactuar con contaminantes minoritarios. Los contaminantes se encuentran inicialmente distribuidos de manera uniforme en el hábitat. Los agentes vegetación se distribuyen inicialmente en parches al azar con una densidad superficial de biomasa, también al azar, en un intervalo definido por densidades mínimas y máximas ( $\rho_{min}$ ,  $\rho_{máx}$ ). Cada agente vegetación presenta un ritmo de crecimiento  $\alpha$  y senescencia  $\omega$  (Leopold, A. C., 1961) de tipo lineal. Los agentes vegetación poseen una biomasa aérea y radicular. La parte aérea del parche, la cual tiene inicialmente al azar un radio  $R_f$ , regula el crecimiento y reproducción del agente vegetación. El crecimiento del agente aumenta en cada paso temporal de la simulación ( $\Delta T$ ). La densidad superficial de biomasa aérea de cada parche se calcula en cada  $\Delta T$ . Si ésta es mayor a  $\rho_{máx}$ , su radio aumenta para que la densidad sea igual a  $\rho_{máx}$ . Análogamente, si la densidad del parche es menor a  $\rho_{min}$  su radio disminuye para que la densidad sea igual a  $\rho_{min}$  (Bustos et al., 2023; Sánchez et al., 2023). El agente vegetación produce una semilla si la densidad de la parte aérea de cada parche supera la densidad máxima y además su radio es mayor a  $R_{f máx}$  (Bustos et al., 2024). Esta dinámica provoca la emergencia de un período temporal  $t_{ps}$  donde aparece la fase de producción de semillas. Cada semilla tiene asociado de manera aleatoria un tiempo de germinación, el cual determina la germinación o no del agente en

el ciclo siguiente. Si la semilla germina, se introduce en el hábitat alrededor de su progenitor pasando al estatus de agente vegetación, en caso contrario, es eliminada del hábitat. La reproducción de los agentes está limitada por una cantidad máxima de reproducciones  $R_{pm\acute{a}x}$  la cual determina el comienzo de senescencia del agente (Miryeganeh, M., 2020), dado por un ritmo de decrecimiento lineal,  $\omega$ . La parte radicular del agente vegetación posee inicialmente al azar, un radio  $R_r$ . El crecimiento o decrecimiento de la raíz está regulado por la relación alométrica raíz/parte aérea (Di Benedetto, M. y Tognetti, J., 2016). El modelo incorpora la competencia entre agentes vegetación a través de sus raíces. Si los radios de las raíces en un paso temporal se intersecan, gana el agente que posea mayor biomasa, mientras que el agente vegetación perdedor, reduce su biomasa. De esta manera, los parches de cada agente vegetación pueden crecer o reducirse hasta inclusive desaparecer (Bustos et al., 2024), simulando entonces especies de plantas anuales (Harper, J. L., 1977).

Por otra parte, se modela el contaminante minoritario como una partícula puntual conservativa con distribución uniforme y movilidad relativa nula (Collado Fernández, D., 2002). La absorción de éste se realiza a través de la parte radicular del agente. Si la distancia entre el agente vegetación y el contaminante es menor a  $R_r$ , este último es absorbido por el agente y se acumula en un contador de contaminantes, de tal manera que si el agente vegetación desaparece del hábitat, los contaminantes acumulados retornan al mismo, en la posición del agente donde estaban acumulados (Bustos et al., 2024) e inmediatamente biodisponibles para los otros agentes vegetación.

El software implementa también una estrategia de fitorremediación con extracción del agente vegetación. En una primera etapa, se modeló la evolución del sistema hasta alcanzar el período de la fase de producción de semillas  $t_{ps}$  y, simultáneamente, extraer todos los agentes vegetación y los contaminantes acumulados en ellos.

Posteriormente, se diseñó una modificación en la estrategia de fitorremediación denominada "geométrica". Para ello, el software utiliza una progresión geométrica de factor  $C_{extracción}$  para calcular la cantidad de contaminantes máxima en suelo en cada ciclo, que habilita la extracción total de los agentes vegetación. Por ejemplo, un coeficiente  $C_{extracción} = 0.9$  indica que los agentes vegetación en su conjunto deben acumular al menos el 10% del contaminante al inicio de cada ciclo para su extracción. Asimismo, determina el periodo de la fase de producción de semillas  $t_{ps}$  e implementa intervalos de pasos temporales de veda  $V_{veda}$ , donde no se permite la extracción del agente vegetación. De esta manera, todos los agentes vegetación son extraídos del hábitat cuando cumplen la doble condición: han absorbido al menos la cantidad de contaminante requerido y además han superado el intervalo de veda. De esta manera, se permite la remoción de contaminantes del hábitat y la regeneración del sistema mediante la producción de semillas, en cada ciclo.

### III. Resultados y Análisis

A continuación, se muestran los resultados obtenidos con la simulación basada en un conjunto de parámetros, en unidades arbitrarias, y datos iniciales para ejemplificar la situación de contaminación en suelo en la localidad de Bouwer (Salazar, J., 2014). Los mismos se consignan en la Tabla 1. La relación alométrica raíz/parte aérea se ajustó según la bibliografía (Di Benedetto, M. y Tognetti, J., 2016). Asimismo, el modelo contempla una competencia entre raíces intermedia (los agentes perdedores de la competencia reducen a la mitad su biomasa).

Tamaño del hábitat $R_h = 100$	$\rho_{m\acute{a}x}$	$\rho_{m\acute{i}n}$	$R_{f m\acute{a}x}$	$R_{f m\acute{i}n}$	$R_{r m\acute{a}x}$	$R_{r m\acute{i}n}$	$\alpha$	$\omega$
Agente Vegetación $N_A = 150$	2	0.4	6	1	5	2	0.01	0.01
Contaminantes $N_c = 6000$								

Tabla 1. Valores de los parámetros utilizados en las simulaciones

En la Figura 1 se muestra la biomasa acumulada en un ciclo (365 pasos temporales en la simulación).

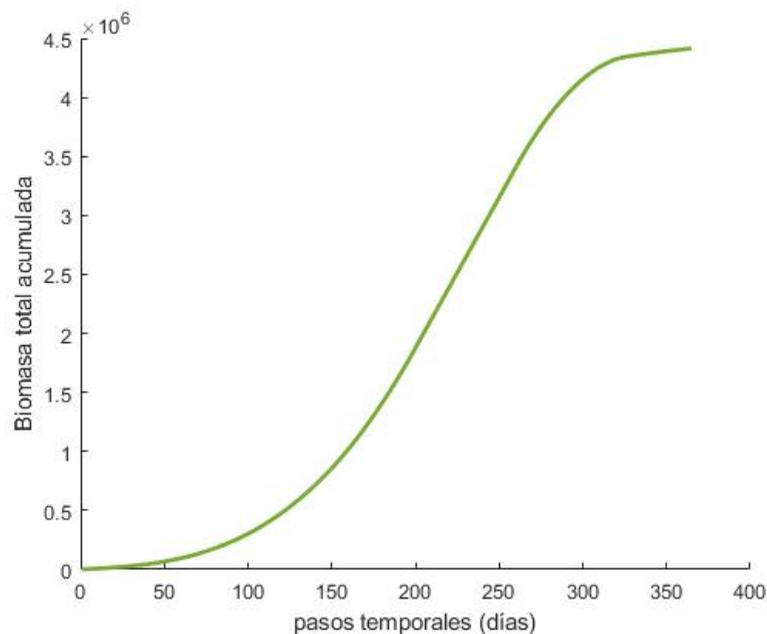


Figura 1. Biomasa acumulada en un ciclo de simulación

Nótese que, aunque los agentes vegetación tienen tasas de crecimiento y senescencia lineales, el crecimiento neto es de tipo sigmoide, en concordancia con la literatura especializada (Richards F, J., 1959; Hunt, R., 1978; Yin et al., 2003). Es importante notar también que este comportamiento no es impuesto, sino que emerge de las reglas locales y globales del Sistema Multiagente.

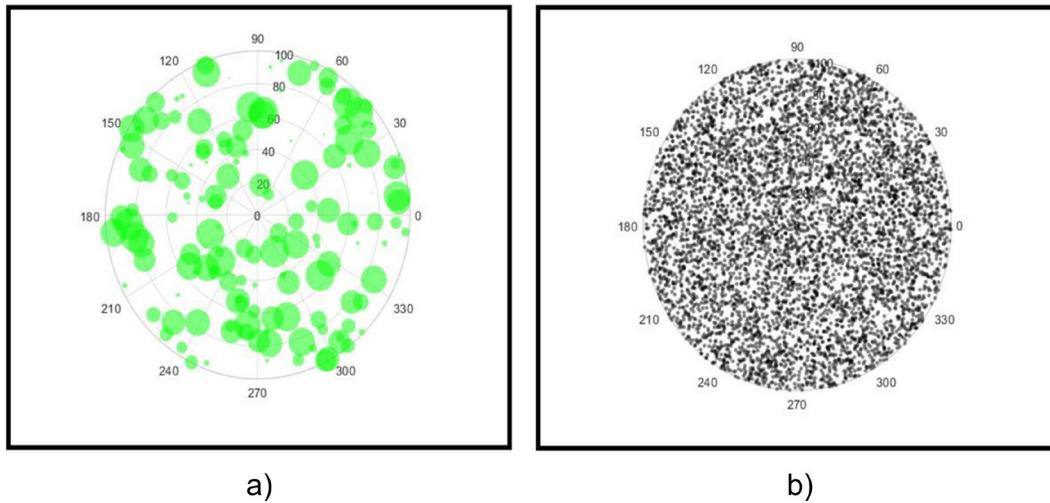


Figura 2. (a) posiciones y tamaños iniciales de los agentes vegetación (verde).  
(b) posiciones iniciales de los contaminantes (puntos grises).

La Figura 2 muestra las posiciones y tamaños iniciales de los agentes vegetación (en color verde), así como las posiciones iniciales de los contaminantes (puntos grises) en el hábitat.

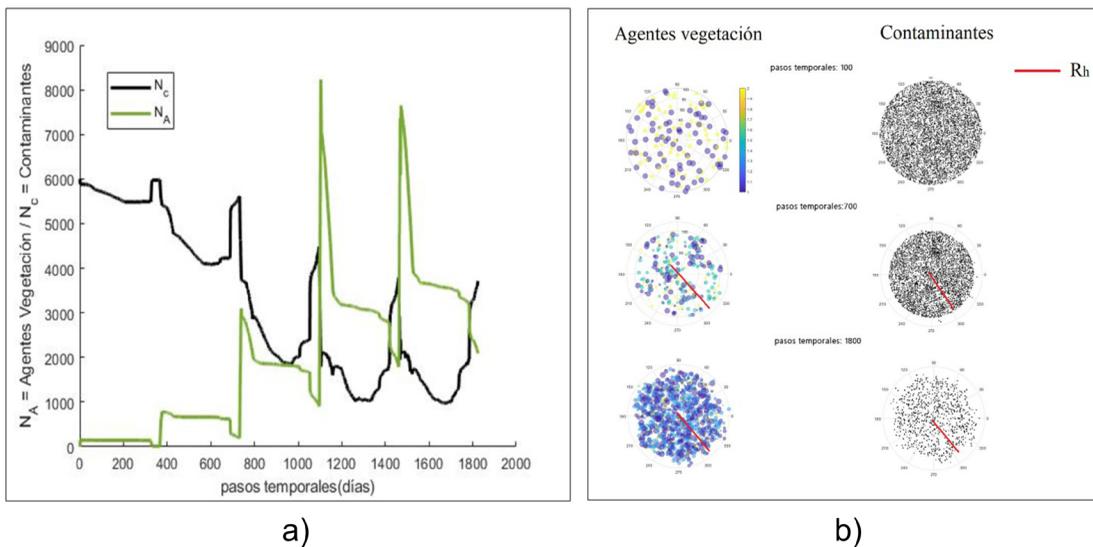


Figura 3. a) Evolución temporal de los contaminantes para cinco años ( cinco ciclos de 365 pasos temporales) b ) Secuencia espacial para tres tiempos distintos (100, 700 y 1800 pasos temporales) de los agentes vegetación (gama de colores amarillo azul correspondiente a diferentes densidades) y contaminantes (puntos grises).

La figura 3.a muestra la evolución temporal del contaminante a lo largo de cinco años (equivalentes a 1800 pasos temporales o a cinco ciclos de 365 pasos temporales). Se observa que las fluctuaciones en los niveles del contaminante en suelo  $N_c$  están relacionadas con las etapas de crecimiento del agente vegetación. La disminución de

los contaminantes en suelo corresponde a su acumulación en los agentes vegetación, mientras que su incremento se asocia con la desaparición de los agentes vegetación del hábitat. Note que los descensos abruptos de los máximos en NA sugieren eventos de colapso masivo de parches de vegetación, atribuibles principalmente al modelado de la competencia interespecífica. Estos eventos producen, en nuestro modelo, un retorno repentino de contaminantes al suelo, generando los picos en  $N_c$ , ya que los contaminantes pasan inmediatamente a estar biodisponibles para los otros agentes vegetación. Este comportamiento constituye un ejemplo de interacción vegetación-contaminante, donde los agentes vegetación modulan la distribución del contaminante en el ambiente (Bustos et al., 2024), pudiendo colonizar nuevos territorios más allá del hábitat original. La figura 3.b presenta este comportamiento a través de una secuencia espacial para tres tiempos representativos (100, 700 y 1800 pasos temporales), donde se muestra la dinámica de los agentes vegetación (codificados por densidad mediante una escala de color) y los contaminantes (puntos grises). Se observan procesos de crecimiento y decrecimiento de los parches, desaparición de éstos del hábitat, nacimiento de nuevos agentes vegetación; así como su redistribución en el paisaje. Es destacable el crecimiento de los parches más allá del radio inicial  $R_h$  (indicado en rojo), así como el vaciamiento local de contaminantes en zonas con vegetación. Cuando los parches desaparecen, ya sea debido a la senescencia o competencia, los contaminantes acumulados retornan al hábitat, en la misma posición del agente, conjuntamente con todos los contaminantes acumulados por éste hasta ese paso temporal (Bustos et al., 2024), quedando, de manera inmediata, biodisponibles para otros agentes vegetación.

La Figura 4 muestra la implementación del procedimiento de fitorremediación mediante la extracción de los agentes vegetación y la consecuente eliminación de los contaminantes del hábitat a lo largo de un período de cinco años. Para facilitar la interpretación de los resultados, se ajustaron las cantidades iniciales del sistema agente vegetación-contaminante, mejorando así la visualización de los datos. Los resultados mostrados en la figura evidencian que esta estrategia de fitorremediación, basada en la remoción completa de los agentes vegetación al alcanzar la fase de producción de semillas  $t_{ps}$ , presenta limitaciones significativas. En primer lugar, el sistema no logra regenerarse debido a la eliminación constante de los agentes vegetación, lo que conduce a la extinción de éstos en el hábitat después de varios ciclos. En segundo lugar, la efectividad de esta estrategia en la remoción de contaminantes es inferior al 40 %, lo que sugiere una eficiencia limitada. Además, se observa que esta estrategia requiere la incorporación externa de nuevos agentes vegetación (siembra) en cada ciclo para mantener el proceso de fitorremediación en funcionamiento. Este enfoque refleja las metodologías tradicionales de fitorremediación en condiciones de campo (Vangronsveld J. y Cunningham, S., 1998; Salazar, J., 2014).

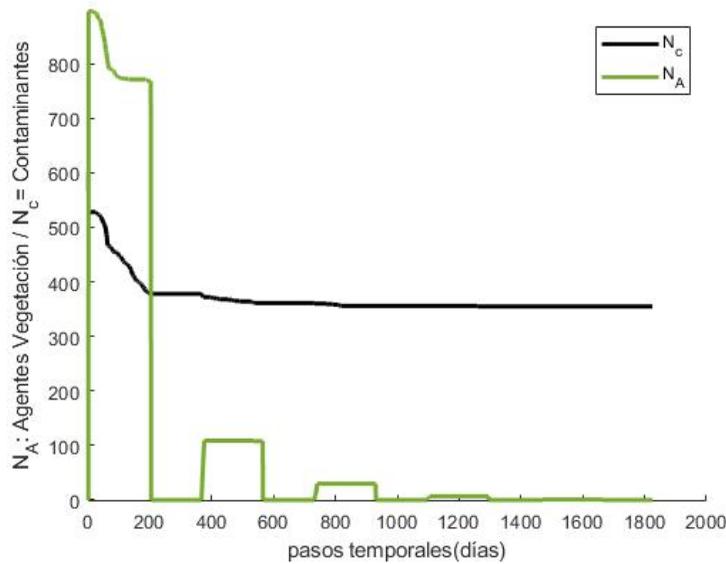


Figura 4. Evolución temporal del sistema agente vegetación-contaminante para cinco años (equivalentes a cinco ciclos de 365 pasos temporales).  $N_A = 1000$ ,  $N_C = 600$ .

La Figura 5 muestra la evolución temporal del sistema para la implementación de la mejora denominada fitorremediación geométrica, como fue descrito en la metodología. Para este caso particular, se utilizaron los siguientes parámetros:  $C_{extracción} = 0.94$  y  $V_{veda} = 100$ . Note que el valor  $C_{extracción}$  empleado es un valor conservador. Siguiendo en esta línea, se observa en la figura que, tras un período de cinco años, el contaminante fue removido del hábitat en un 98 %. Esto da cuenta de la mayor efectividad del modelo propuesto respecto a la fitorremediación tradicional, tanto en la remoción de contaminantes en suelo como en la regeneración del hábitat, según las condiciones establecidas.

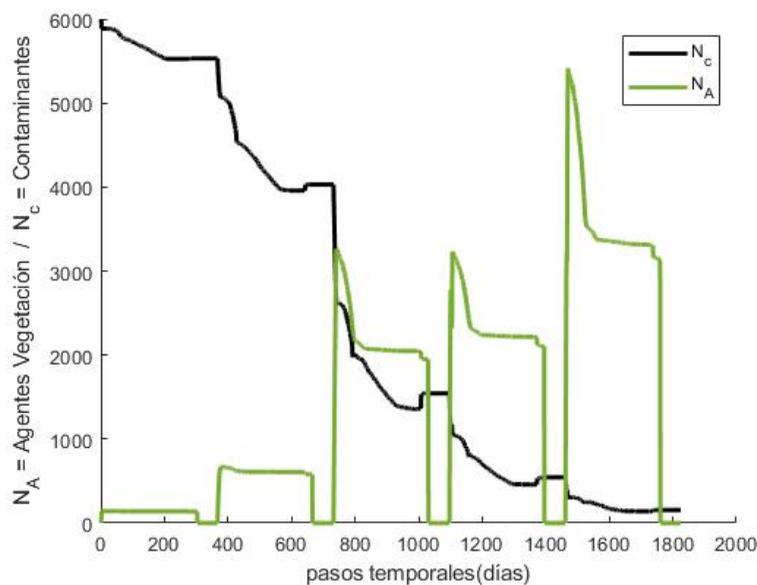


Figura 5. Evolución temporal del sistema agente vegetación-contaminante para cinco años (equivalentes a cinco ciclos de 365 pasos temporales).

La Figura 6.a muestra la cantidad de contaminantes en el suelo presentes en el hábitat al cabo del quinto ciclo, en función del intervalo de veda  $V_{veda}$ . Se puede notar en la figura que, a partir de  $V_{veda} = 50$ , la cantidad de contaminante en el suelo disminuye por debajo del 95 % de la cantidad inicial de contaminantes presentes en el hábitat y, además, no hay variaciones significativas para intervalos de veda mayores. La Figura 6.b muestra esta dependencia para tres, cuatro y cinco ciclos de fitorremediación geométrica. Puede observarse que, para cinco ciclos, el número inicial de agentes ( $N_A = 150$ ) no afecta sustancialmente la concentración remanente de contaminantes. Esta tendencia se observa a partir de un número inicial de agentes  $N_A = 300$  para el cuarto ciclo, mientras que el tercer ciclo muestra fluctuaciones marcadas respecto al número inicial de agentes en el hábitat.

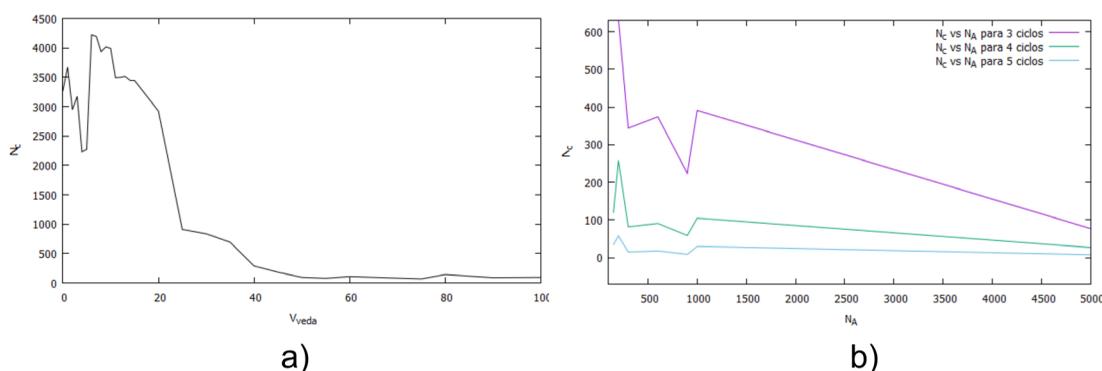


Figura 6. Número de contaminantes en el hábitat a) en función del intervalo de veda  $V_{veda}$ , a los cinco años b) en función de la cantidad de agentes vegetación inicial  $N_A$ , para el tercer, cuarto y quinto año.

Como fue mencionado anteriormente, se tomó en primera instancia el factor geométrico  $C_{extracción}$  con un valor conservador para realizar un primer análisis. Ahora se propone estudiar la dependencia de la remoción de contaminantes en función de este factor. El interés de este estudio es estimar, al menos de manera cualitativa, la mínima cantidad de ciclos de extracción necesarios para obtener una concentración en suelo por debajo de un valor establecido y permitir la regeneración del sistema.

La Figura 7.a muestra la variación del número de contaminantes en suelo en función del factor  $C_{extracción}$ . Se puede observar que a partir de  $C_{extracción} = 0.7$  se produce la mayor cantidad de remoción del contaminante del hábitat, mientras que para valores inferiores, la remoción pierde efectividad. La Figura 7.b muestra la variación del número inicial de agentes en el hábitat en función de  $C_{extracción}$ . Se puede observar en esta figura que el número de agentes decrece linealmente para valores de  $C_{extracción} \geq 0.7$  mientras que para valores menores se observa un pronunciado cambio en la tendencia. Es decir, un aumento significativo del número de agentes es requerido para remover al cuarto ciclo el 98 % del contaminante en suelo.

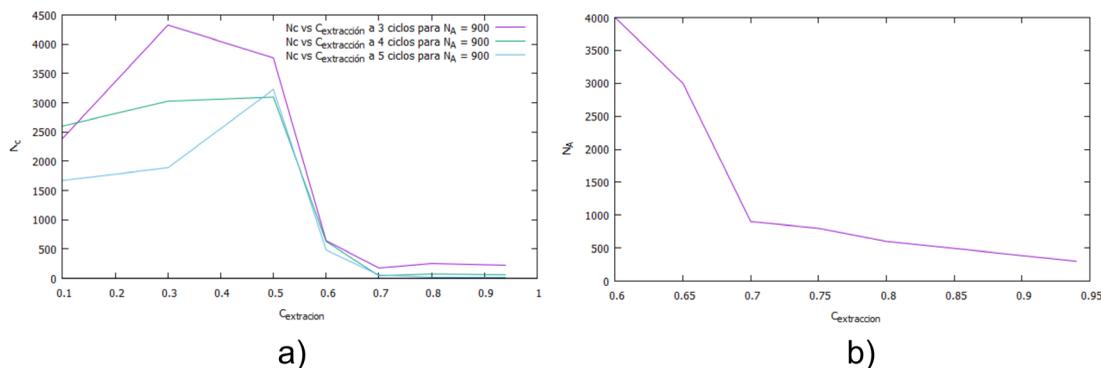


Figura 7. a) Número de contaminantes remanentes en el hábitat en función del factor  $C_{extracción}$  para tres ciclos de simulación b) Número de agentes vegetación inicial  $N_A$  en el hábitat en función del factor  $C_{extracción}$ .

## Conclusiones y Perspectivas

Se desarrolló un código en Matlab para un sistema multiagente que presenta agentes vegetación y contaminantes en un hábitat plano circular. Se modeló el ritmo de crecimiento de la biomasa del agente vegetación de tipo lineal, tanto para el crecimiento como para la senescencia. Además, se tuvieron en cuenta relaciones alométricas que vinculan la parte aérea y la parte radicular para el crecimiento, reproducción y desaparición del hábitat de los agentes vegetación. De esta manera, los agentes vegetación simulan especies de ciclos anuales. Se ha logrado describir comportamientos emergentes observables mediante la adopción de reglas locales simples, tales como crecimiento sigmoideo y ventanas cíclicas de producción de semillas. Se ha estudiado la efectividad de estrategias de fitorremediación que se utilizan actualmente y se las ha comparado con una nueva estrategia denominada fitorremediación geométrica. Se ha observado que con la misma especie vegetal se podría lograr una efectividad mayor mediante esta última. Para ello, se estudió el período y la ventana temporal de la fase de producción de semilla y se implementó en el programa la extracción total de los agentes cuando se cumplimentó la doble condición descrita en la metodología. Se realizó un primer estudio de la dependencia entre la cantidad de contaminante en suelo, el intervalo de veda  $V_{veda}$  y el número inicial de agentes vegetación en el hábitat para un factor geométrico conservador. De este estudio podemos inferir no sólo que a partir de  $V_{veda} = 50$  la cantidad de contaminante en suelo disminuye por debajo del 98 % de la cantidad de contaminante inicial, sino que además no hay variaciones significativas del número de contaminantes en suelo para intervalos de veda mayores. Por el contrario, para valores de intervalo de veda cercanos a cero, se observan marcadas fluctuaciones. Se realizó también el estudio de la dependencia entre la cantidad de contaminante remanente en suelo y el número inicial de agentes vegetación. Se observó que, a partir de cierto umbral, para cuatro y cinco ciclos de simulación, el número de agentes no afecta la concentración remanente de contaminantes, mientras que para tres ciclos se observan grandes fluctuaciones. Asimismo, se analizó la relación entre la cantidad de contaminante remanente y el factor de extracción, así como la dependencia entre la cantidad inicial de agentes vegetación en el hábitat y el factor de extracción, para cuatro ciclos. Se observó que el número de agentes decrece linealmente para valores de  $C_{extracción} \geq 0.7$ , mientras que para valores menores de este

factor se observa un pronunciado cambio en la tendencia. Es decir, para valores ligeramente inferiores se requiere un aumento sustancial en la cantidad de agentes vegetación. Este resultado, de acuerdo a nuestro modelo, está relacionado con el hecho de que un coeficiente de extracción bajo implica que los agentes deben acumular una cantidad considerable de contaminante antes de que finalice el intervalo de veda, lo que impide la extracción en varios ciclos. Como consecuencia, el contaminante retorna al hábitat, generando ciclos de fluctuaciones en sus niveles en el suelo, como se observó en la Figura 3. El estudio de estos resultados muestra que, en cuanto a la cantidad mínima de ciclos de extracción necesarios para reducir el contaminante en suelo a menos del 2 % de la concentración inicial y garantizar la regeneración de los agentes vegetación, este requisito se cumplía para cinco ciclos con bajas poblaciones iniciales de agentes, para intervalos de veda flexibles y un factor geométrico conservador. En cambio, para conseguir los mismos resultados en cuatro ciclos de extracción se requiere aumentar el número de agentes iniciales en el hábitat y adoptar un factor geométrico menos conservador.

Por último, la versatilidad del código permitirá incorporar mayor detalle en las características de las especies vegetales empleadas en la fitorremediación, así como de los mecanismos de absorción del contaminante por los agentes, proporcionando una descripción más precisa. Además, el modelo podrá utilizarse para complejizar el hábitat mediante la inclusión de otro agente móvil que represente un consumidor primario o para estudiar la distribución de micronutrientes, facilitando la planificación temporal y espacial de la aplicación de fertilizantes.

### **Agradecimientos**

A la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Universidad Tecnológica Nacional (UTN) por el apoyo a través del proyecto PID “Aproximación al Modelado Ecosistémico de la Relación Presa – Predador Mediante Sistemas Multiagente” y a la UTN – Facultad Regional Córdoba donde realizamos nuestro trabajo.

## Referencias

- Bustos, N. C., Sánchez, C. M., Brusa, D. H., Ré, M. A. y Britch, J. (2023). "Modelado Estocástico Alternativo a Lokta-Volterra mediante un Sistema Multiagente ". Revista Tecnología Y Ciencia, (47), 35-46. <https://doi.org/10.33414/rtyc.47.35-46.2023>
- Bustos, N. C., Sánchez, C. M. y Britch, J. (23-10-2024) "Modelado mediante Sistemas Multiagentes de la redistribución espacial de un contaminante minoritario en suelo, por acción de la cobertura vegetal". San Francisco UTN, F. R. Jornadas de Ciencia y Tecnología 2024. AJEA (Actas De Jornadas Y Eventos Académicos De UTN), (AJEA 44). <https://doi.org/10.33414/ajea.1776.2024>
- Collado Fernández, D. (2002) " Movilizacion de contaminantes en terreno a partir de suelos contaminados".  
Universidad de Granada, España.
- Coyago, E. y Bonilla, S. (2014). "Absorción de plomo de suelos altamente contaminados en especies vegetativas usadas para consumo animal y humano". La Granja: Revista de ciencias de la vida, 23, 35-46.
- Di Benedetto, A, y Tognetti, J. (2016). " Técnicas de análisis de crecimiento de plantas: su aplicación a cultivos intensivos". RIA. Revista de investigaciones agropecuarias, 42(3), 258-282. [https://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1669-23142016000300007&lng=es&tlng=](https://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1669-23142016000300007&lng=es&tlng=).
- García, I. y Dorronsoro, C. (2005). "Contaminación por metales pesados". En Tecnología de Suelos. Universidad de Granada. Departamento de Edafología y Química Agrícola. Disponible en <<http://edafologia.ugr.es>>
- Harper, J. L. (1977). Population Biology of Plants. New York, NY: Academic Press, 892 p.
- Hunt, R. (1978) Plant Growth Analysis. Edward Arnold, London, 37.
- Hermoso de Mendoza García, M., Solres Rodríguez, F., Pérez López, M. (2008). "Los mamíferos salvajes terrestres como bioindicadores: nuevos avances en toxicología". Observatorio Medioambiental, 11, 37-62.
- Lasat, M. (2000)."Phytoextraction of metals from contaminated soil: a review of plant/soil/metal interaction and assessment of pertinent agronomic issues". J. Hazard Subst Res 2, 1-25.
- Leopold, A. C. (1961). "Senescence in Plant Development: The death of plants or plant parts may be of positive ecological or physiological value". Science, 134(3492), 1727-1732. doi:10.1126/science.134.3492.1727.
- Miryeganeh, M. (2020) "Synchronization of senescence and desynchronization of flowering in Arabidopsis thaliana". AoB Plants, Vol. 12, N° 3.
- Pagnanelli, F., Moscardini, E., Giuliano, V. and Toro, L. (2004). "Sequential Extraction of Heavy Metals in River Sediments of an Abandoned Pyrite Mining Area: Pollution Detection and Affinity Series". Environmental Pollution, 132,189-201.
- Prieto Méndez, J., González Ramírez, C. A., Román Gutiérrez, A. D., y Prieto García, F. (2009). "Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de

suelos y agua". *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 10,1-3.

Richards, F. J. (1959) "A Flexible Growth Function for Empirical Use". *Journal of Experimental Botany*. Vol 10, N° 29. p. 290-30.

Rodríguez Eugenio, N., McLaughlin, M. y Pennock, D. (2019). "La contaminación del suelo: una realidad oculta". Roma, FAO.

Salazar, J. (2014). "Fitorremediación de suelos contaminados con metales pesados. Evaluación de especies nativas en la Provincia de Córdoba" Tesis Doctoral. Facultad de ciencias exactas, física y naturales (UNC), Córdoba, Argentina.

Sánchez, C., Bustos, N. Brusa, D., Re, M., Britch, J. "Modelado de la dinámica poblacional en un ecosistema simple compuesto de una cobertura vegetal y un consumidor primario mediante un sistema multiagentes". San Francisco UTN, F. R. (2023). *Jornadas de Ciencia y Tecnología 2023. AJEA (Actas De Jornadas Y Eventos Académicos De UTN)*, (AJEA 26). Disponible en: <https://doi.org/10.33414/ajea.1301.2023>.

Shah, V. y Daverey, A. (2020). "Environmental technology and innovation phytoremediation: a multidisciplinary approach to clean up heavy metal contaminated soil". *Environmental Technology and Innovation*, 18, 100774.

Smith, E. S., Christophersen, M. H., Pope, S., y Andrew, S. F. (2010). "Arsenic uptake and toxicity in plants: integrating mycorrhizal influences". *Plant Soil*. 327, 1-21.

Souza, F. J., Dolder, H. y Cortelazzo, A.L. (2005). "Effect of excess cadmium and zinc ion son roots and shoots of maize seedlings". *J. Plant Nutr.* 28, 1923-1931.

Vangronsveld, J. y Cunningham, S. (1998). "Metal-contaminated soils: In situ inactivation and phytoremediation". *Environmental Science*. Disponible en: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:129354283>.

Yin, X., Goudriaan, J., Lantinga, E. A., Vos, J., Spiertz, H. J. (2003). "A flexible sigmoid function of determinate growth". *Annals of Botany* 91,3, 361-371.

### Contribución de los Autores

Nombres y Apellidos del autor	Colaboración Académica												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Natalia Bustos	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X		
Claudia M. Sánchez	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X
Javier Britch	X	X	X	X		X	X	X	X	X		X	X

1-Administración del proyecto, 2-Adquisición de fondos, 3-Análisis formal, 4-Conceptualización, 5-Curaduría de datos, 6-Escritura – revisión y edición, 7-Investigación, 8-Metodología, 9-Recursos, 10-Redacción – borrador original, 11-Software, 12-Supervisión, 13-Validación, 14-Visualización.