

Modelación del comportamiento de los agroquímicos en suelos de cultivo de cebolla en el municipio de Aquitania, Boyacá Colombia

Modelagem do comportamento dos agrotóxicos em solos de cultivo de cebola no município de Aquitania, Boyacá, Colômbia

Modeling the behavior of agrochemicals in onion cropland soils in the municipality of Aquitania, Boyacá, Colombia

DOI: 10.34188/bjaerv8n1-120

Submetido: 02/12/2024

Aprovado: 15/01/2025

Jaime Andrés Gil Morales

Ingeniero en Recursos Hídricos y Gestión Ambiental por la Universidad Central/ Magister en Salud Pública y Desarrollo Social por la Universidad Área Andina
Universidad Distrital Francisco José de Caldas UDFJC/Facultad del medio Ambiente y Recursos Naturales
Bogotá D.C.. Colombia
correo-e: jagilm@udistrital.edu.co

Angela María Jaramillo Londoño

Bióloga marina por la Universidad Jorge Tadeo Lozano/Doctor en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente por la Universidad Politécnica de Valencia
Universidad Santo Tomás/ Facultad de Ciencias Ambientales
Bogotá D.C.. Colombia
correo-e: angelajaramillo@usta.edu.co

Leidy Fernanda Jiménez Castro

Ingeniera Ambiental por la Universidad ECCI
Universidad ECCI/ Facultad de Ingeniería
Bogotá D.C.. Colombia
correo-e: leidyf.jimenezc@ecc.edu.co

Fabián Darío Cantor Preciado

Ingeniero Ambiental por la Universidad ECCI
Universidad ECCI/ Facultad de Ingeniería
Bogotá D.C.. Colombia
correo-e: fabiand.cantorp@ecc.edu.co

Fredy Alexander Segura Poveda

Ingeniero Ambiental por la Universidad ECCI
Universidad ECCI/ Facultad de Ingeniería
Bogotá D.C.. Colombia
correo-e: fredya.segurap@ecc.edu.co

RESUMEN

El propósito de esta investigación es analizar los efectos negativos de los diferentes agroquímicos utilizados en el cultivo de cebolla larga (*Allium fistulosum*) en las veredas de Suse y Vargas (Aquitania, Boyacá, Colombia). Se modeló el comportamiento de los agroquímicos en el suelo y su tasa de infiltración utilizando el software Hydrus ID y el Software KOSTIAKOV. Se identificaron los componentes de agroquímicos con mayor concentración en el suelo, como son el Methyl parathion, Bolstar y Fensulfothion, los cuales superaron los límites permitidos en los suelos.

Palabras clave: agroquímicos, *Allium fistulosum*, contaminación del suelo, Hydrus ID, KOSTIAKOV.

RESUMO

O objetivo desta pesquisa é analisar os efeitos negativos dos diferentes agroquímicos usados no cultivo de cebola longa (*Allium fistulosum*) nos vilarejos de Suse e Vargas (Aquitania, Boyacá, Colômbia). O comportamento dos agroquímicos no solo e sua taxa de infiltração foram modelados usando os softwares Hydrus ID e KOSTIAKOV. Foram identificados os componentes agroquímicos com maior concentração no solo, como parationa metílica, Bolstar e Fensulfothion, que excederam os limites permitidos no solo.

Palavras-chave: agrotóxicos, *Allium fistulosum*, contaminação do solo, Hydrus ID, KOSTIAKOV.

ABSTRACT

The purpose of this research is analyzing the negative effects the commonly used agrochemicals used in the cultivation of long onion (*Allium fistulosum*) in the Suse and Vargas hamlets (Aquitania, Boyacá, Colombia). The behavior of agrochemical components in the soil and their infiltration rate was modeled using Hydrus ID software and KOSTIAKOV software. The agrochemical components with the highest concentration in the soil were identified, such as Methyl parathion, Bolstar, and Fensulfothion, which exceed the allowed limits in the soil.

Keywords: agrochemicals, *Allium fistulosum*, soil contamination, Hydrus ID, KOSTIAKOV.

1 INTRODUCCIÓN

En el municipio de Aquitania, Boyacá, los agroquímicos son ampliamente utilizados en los cultivos de cebolla larga con el propósito de aumentar el rendimiento, proteger contra plagas y enfermedades, y promover un crecimiento rápido. Sin embargo, el desconocimiento de los efectos adversos derivados del uso indiscriminado de estos agentes químicos ha llevado a los agricultores a implementar métodos de mitigación de plagas que podrían tener consecuencias negativas a largo plazo, afectando la producción y provocando la degradación del suelo.

La investigación científica respalda la preocupación por los efectos del uso de agroquímicos en los suelos cultivados. Diversos estudios han demostrado que el uso de agroquímicos puede ocasionar desequilibrios significativos tanto a nivel físico como químico en los suelos. Se ha observado que varios componentes presentes en estos productos químicos están asociados a diversos procesos, los cuales se desencadenan a través de su absorción por parte del suelo debido al uso

excesivo de los mismos. Estos desequilibrios pueden tener consecuencias negativas tales como deterioro, erosión y acidificación en la zona (Smith et al., 2018; Johnson & Smith, 2020).

Además, investigaciones señalan que la aplicación directa de agroquímicos al suelo presenta un alto porcentaje de utilización, lo cual puede resultar en afectaciones a corto plazo debido al manejo inadecuado de estos productos químicos (Gómez & Pérez, 2021). Se analizan aspectos físicos, bióticos y ambientales con la finalidad de explorar los efectos de la aplicación de una nueva matriz productiva basada en agricultura y su incidencia en el manejo y preservación de los recursos naturales. (Goyhenetche, 2022)

Es importante resaltar que a nivel mundial se registra un elevado uso de agroquímicos cada año. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), se estima que anualmente se utilizan aproximadamente 4.6 millones de toneladas de plaguicidas y alrededor de 115 millones de toneladas de fertilizantes nitrogenados (FAO, 2020). Esta práctica masiva de uso de agroquímicos puede conllevar a la pérdida de propiedades del suelo, ya que su eficacia depende de las condiciones climáticas, el tipo de suelo, las características específicas del agroquímico y su solubilidad en el agua. Por lo tanto, estos compuestos químicos pueden considerarse como tóxicos para los organismos bióticos y los componentes abióticos del ecosistema (Vivas, 2020).

Adicionalmente, estudios recientes han puesto de manifiesto los efectos negativos de los agroquímicos en la biodiversidad del suelo y su impacto en la microbiota edáfica. La exposición a estos productos químicos puede afectar negativamente la diversidad y abundancia de microorganismos benéficos para el suelo, como bacterias fijadoras de nitrógeno y hongos micorrícicos arbusculares, que desempeñan un papel crucial en la disponibilidad de nutrientes para las plantas (Martínez et al., 2019; Smith et al., 2018).

Asimismo, se ha observado que el uso continuo de agroquímicos puede generar resistencia en poblaciones de plagas, reduciendo la efectividad de estos productos químicos y aumentando la dependencia de los agricultores en dosis cada vez mayores, lo que perpetúa el ciclo de impacto negativo en el suelo y el medio ambiente (Johnson & Smith, 2020).

Los agroquímicos utilizados en los cultivos de cebolla en el municipio de Aquitania presentan un potencial impacto negativo en los suelos debido a su uso indiscriminado. Los desequilibrios físicos y químicos causados por estos productos químicos pueden tener consecuencias perjudiciales para la calidad del suelo y la producción agrícola. Es fundamental tomar medidas adecuadas para el manejo responsable de los agroquímicos, considerando las recomendaciones científicas y promoviendo prácticas agrícolas sostenibles que minimicen el impacto ambiental y salvaguarden la salud del ecosistema agrícola.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

Esta investigación tiene como objetivo describir el comportamiento del suelo frente a los efectos de los agroquímicos utilizados en el cultivo de cebolla larga en el municipio de Aquitania, Boyacá. Se emplea un enfoque descriptivo que involucra la recopilación y análisis de información relevante. El diseño de investigación se basa en la representación gráfica y secuencial de todo el proceso de trabajo, mostrando las tareas y actividades necesarias para determinar el impacto de los agroquímicos en el suelo. El análisis se centra en el manejo de los agroquímicos en la zona de estudio, buscando identificar el comportamiento del suelo.

2.2 POBLACIÓN Y MUESTRA

Se realiza una revisión documental para obtener información sobre la capacidad de uso y conservación de los suelos en el municipio, centrándose en las prácticas agrícolas y el uso de agroquímicos en el cultivo de cebolla. Se recopilan datos históricos no mayor a 10 años sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, como la profundidad útil, la textura, el drenaje y el desarrollo del perfil, que se utilizarán como criterios de diagnóstico en la modelación matemática.

La metodología utilizada en esta investigación se basa en varios pasos. En primer lugar, se lleva a cabo una descripción morfológica de los suelos en las veredas de Suse y Vargas en el municipio de Aquitania, Boyacá, siguiendo los criterios establecidos por la FAO. Estas veredas son de particular interés debido a su ubicación cercana al lago de Tota y su importancia para el estudio.

2.3 INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

La modelación se lleva a cabo utilizando el software HYDRUS, que resuelve numéricamente la ecuación de Richards para el flujo de agua con saturación variable. Esto permite tener en cuenta la absorción de agua por las raíces de las plantas y estudiar el comportamiento de los suelos no saturados.

Este programa utiliza la ecuación de Richards. Esta ecuación formula la variación del contenido del agua o el soluto en función del tiempo. (Mora.2021)

Ecuación 1 (modelo matemático)

$$\frac{\delta h}{\delta t} = \frac{1}{C(h)} \frac{\delta}{\delta z} \left[K(h) \left(\frac{\delta h}{\delta z} + 1 \right) \right] - \frac{s}{C(h)} \quad [1]$$

Donde:

$C(h)$ = Capacidad específica del agua, pendiente de la curva de retención de humedad del suelo $\partial\theta/\partial h$ en el punto h de la función

$K(h)$ = es la función de conductividad hidráulica en el punto h [LT⁻¹];

h = es el valor de la presión en función del contenido de humedad volumétrico θ del suelo [L]

$S(h, z)$ = el término que representa el agua extraída por las raíces.

2.4 ANÁLISIS DE DATOS

Se empleó el software KOSTIAKOV para establecer la ecuación que relaciona la infiltración acumulada en función del tiempo, teniendo en cuenta el uso de agroquímicos en los suelos. Esta herramienta permitió analizar el comportamiento de los componentes de los agroquímicos en el suelo a través de la interpretación de los datos recopilados durante la investigación.

Asimismo, se aplicó el modelo de Kostiakov, el cual propone una ecuación para determinar la tasa de infiltración y la infiltración acumulada en relación al tiempo. Se emplean diversas modificaciones de este modelo que se ajustan a las condiciones específicas del estudio, permitiendo una mejor caracterización de la infiltración en los suelos y su relación con el uso de agroquímicos.

El modelo de Kostiakov que define la ecuación de velocidad de infiltración (2) como:

$$I = k * t^n \quad [2]$$

Donde:

I = velocidad de infiltración, en cm/h. k = factor numérico adimensional, representa la velocidad de infiltración en cm/h

Durante el intervalo inicial, se obtiene analítica o gráficamente y es el parámetro del ajuste de los datos de campo al modelo. n : exponente que varía entre 0 y -1. Representa la tasa de cambio de la variable dependiente (I) respecto de la variable independiente (t), explicando la disminución de la I con el t . Cuando se grafican los datos de campo y se ajustan al modelo, es la pendiente de la curva de ajuste. t = tiempo de infiltración, en minutos. Morales (2020).

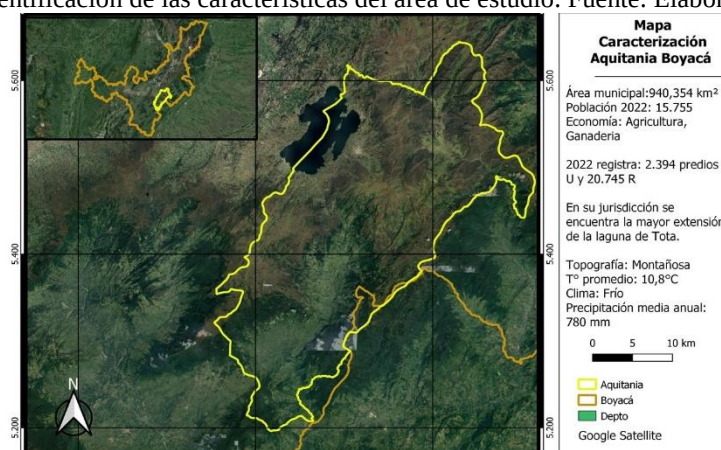
3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA

El municipio de Aquitania se encuentra ubicado en el departamento de Boyacá, está situado en la región central de los Andes, a una altitud promedio de 3.080 metros sobre el nivel del mar. Limita al norte con el municipio de Tota, al sur con el municipio de Firavitoba, al este con el municipio de Sogamoso y al oeste con el municipio de Pesca. se encuentra en las cercanías del lago de Tota, cuenta con una extensión territorial de aproximadamente 170 kilómetros cuadrados y su topografía es predominantemente montañosa (figura 1).

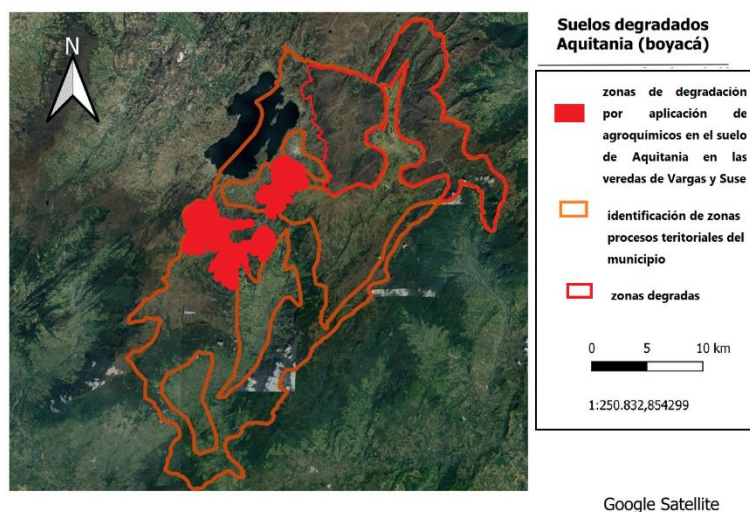
Se emplearon sistemas informáticos especializados en la gestión de datos espaciales para analizar la caracterización del área de estudio. Mediante el uso de estos sistemas, se generaron salidas gráficas y mapas de conflictos que permitieron identificar claramente las zonas más degradadas dentro del área analizada.

Figura 1. Identificación de las características del área de estudio. Fuente: Elaboración propia.



Mediante la identificación de las coberturas del suelo y la clasificación basada en las clases agrológicas y unidades del suelo (figura 2), se ha generado un mapa de conflictos que revela la afectación del uso del suelo en el área de estudio, específicamente en las veredas de Suse y Vargas, debido al manejo del cultivo de cebolla. Este mapa destaca las áreas donde se presentan conflictos y tensiones relacionados con el uso y manejo del suelo en dichas veredas. los polígonos en rojo presentan las mayores zonas con degradación del municipio y la afectación espacial de los agroquímicos.

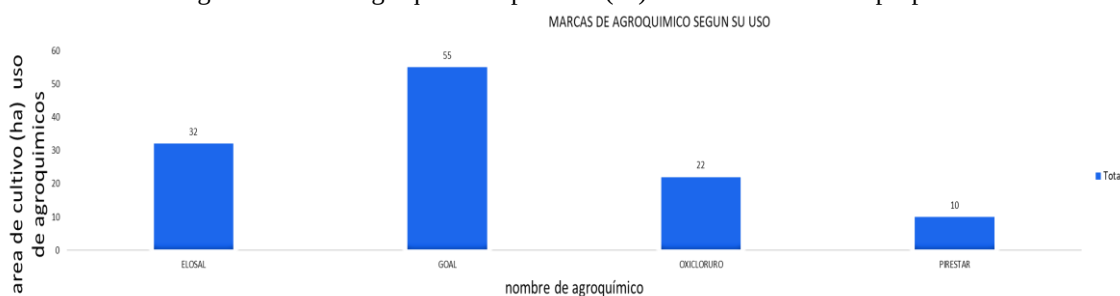
Figura 2. mapa de Identificación de áreas susceptibles por el uso de agroquímicos del área de estudio. Fuente: Elaboración propia.



3.2 PARÁMETROS DE REACCIÓN EN EL SUELO

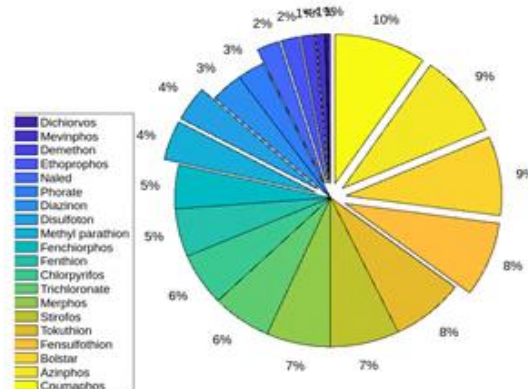
Durante el análisis del suelo, se tomaron en cuenta diversos aspectos, incluyendo los tipos de agroquímicos utilizados. Además, se prestó especial atención a la observación detallada de la problemática a abordar y a las características específicas del suelo (figura 3). Se optó por un enfoque descriptivo en el cual se interpretaron los patrones de uso de agroquímicos por hectárea (entre 1 a 1000 ha), con el objetivo de establecer un nivel de confianza en dichos datos. Evidenciando el manejo de los productos con mayor uso en el área de estudio.

Figura 3. Uso de agroquímicos por área (ha) Fuente: Elaboración propia.



A partir de los análisis realizados en el área, se recopilieron datos sobre las concentraciones y los componentes químicos más utilizados en los cultivos de cebolla. Estos análisis permitieron observar el comportamiento de estos componentes en los suelos y se obtuvieron resultados relevantes (figura 4). Estos resultados son fundamentales para implementar estrategias que ayuden a reducir los componentes que se encuentran por encima de los límites permitidos, así como para brindar apoyo en la recuperación de los suelos que se encuentran degradados.

Figura 4. Porcentaje de agroquímicos utilizados Fuente: Elaboración propia.



Se llevó a cabo la determinación del tiempo y la distancia del transporte del contaminante en un perfil de suelo. Para realizar esta modelación, se consideraron las concentraciones de los químicos más utilizados en la zona de estudio. (amoniaco, Methyl parathion, Bolstar, Fensulfothion y Naled).

Con base en la información anterior, se seleccionaron los componentes químicos con mayor concentración, tal como se evidenció en el análisis. A partir de esto, se construyó un modelo para determinar el tiempo de retención de los agroquímicos en el suelo, considerando la profundidad y los diferentes componentes a lo largo de los días.

Se utilizó el software HYDRUS 1D para llevar a cabo la modelación del transporte de solutos. En este proceso, se seleccionó el modelo hidráulico de van Genuchten (1980) para obtener las propiedades hidráulicas, sin considerar el fenómeno de histéresis durante el cálculo. El objetivo de esta elección es determinar la conductividad hidráulica y los parámetros de flujo de agua en el suelo.

En el estudio, se obtuvieron los siguientes valores de propiedades hidráulicas y parámetros del modelo de van Genuchten para el suelo: el contenido de humedad residual fue de 0.078 Qr, el contenido de humedad saturado fue de 0.43 Qs, el valor de Alpha en el modelo fue de 0.036 [1/cm], y n tuvo un valor de 1.56 [-]. La conductividad hidráulica saturada se determinó como 24.96 [kg cm/día], y el parámetro que representa el grado de conectividad de los poros fue de 0.5 I[-]. Cabe mencionar que, para este caso, el valor del parámetro de tortuosidad en la función de conductividad fue dejado por defecto.

En esta parte del proceso, se determinaron los parámetros de transporte de solutos para cada tipo de agroquímico, como la densidad expresada en g/cm³. Además, para cada soluto modelado, en este caso los agroquímicos utilizados que más se usan en la zona como amoniaco, Methyl parathion, Bolstar, Fensulfothion y Naled, se obtuvieron los respectivos valores, mientras que los otros parámetros se dejaron en sus valores predeterminados.

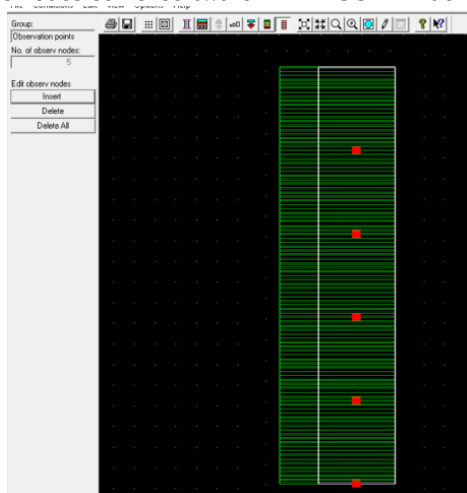
Cada agroquímico presenta un coeficiente de adsorción que indica su afinidad o tendencia a ser retenido por el suelo. Cuando el coeficiente de adsorción es menor, el compuesto tiende a disolverse más fácilmente en el agua subterránea o no ser fijado a la materia orgánica del suelo. Por otro lado, cuando el coeficiente de adsorción es mayor, el agroquímico tiende a ser más retenido por el suelo, los sedimentos y la materia orgánica. Así, se asigna un valor específico de coeficiente de adsorción para cada soluto analizado en el estudio. (1.96-0.58-0.309-0.362) respectivamente.

3.3 PERFIL DEL SUELO EDICIÓN GRÁFICA

En esta sección, se lleva a cabo una tarea fundamental que es la edición de la distribución de los compuestos agroquímicos, teniendo en cuenta diversos factores como las variables hidráulicas y la ubicación de las zonas para el balance de masa. Para garantizar una modelación precisa del comportamiento de los agroquímicos, se determinaron puntos de control a lo largo del perfil de suelo, ubicando cada uno de ellos a una distancia de 20 cm, lo que resultó en un total de 5 nodos para este análisis.

Estos puntos de control son cruciales para entender el trayecto y el comportamiento de los solutos en el suelo, lo que permitirá una interpretación detallada de cómo los agroquímicos se desplazan a lo largo del perfil y cómo interactúan con las diferentes propiedades y características del suelo. Además, la ubicación estratégica de los nodos (figura 5) proporciona información valiosa sobre la distribución espacial de los compuestos y cómo varía su concentración a lo largo del tiempo y la profundidad del suelo.

Figura 5. Ubicación de nodos con el software HYDRUS 1D Fuente: Elaboración propia.



La utilización de múltiples puntos de control es una práctica fundamental en la modelación hidrológica, ya que nos permite obtener resultados más precisos y confiables al tener en cuenta la variabilidad espacial y temporal de los procesos involucrados.

3.4 ANÁLISIS DE MODELACIÓN

Se presentan los resultados obtenidos en el análisis de datos para tres de los contaminantes más utilizados en el cultivo de cebolla larga. El propósito es identificar el comportamiento y transporte de estos químicos agrícolas en el suelo, así como su impacto en la cobertura del suelo y su degradación mediante la modelación. Se ha encontrado que los componentes con mayor concentración en el suelo son Methyl parathion, Bolstar y Fensulfothion, los cuales superan los límites permitidos en los suelos. Por esta razón, se seleccionaron estos tres agroquímicos para la modelación, obteniendo análisis muy similares en los resultados

Al final de la modelación, se pueden observar dos gráficas importantes que son relevantes para el análisis. La primera es la curva de transporte del soluto (figura 6), donde en el eje (y) se representa la concentración del soluto, y en el eje (x) se muestra el tiempo transcurrido en días. En esta gráfica, se evidencia una disminución de aproximadamente 0,1 mmol/cm³ en los tres agroquímicos por día.

Figura 6. Curva de transporte del soluto software HYDRUS 1D Fuente: Elaboración propia.

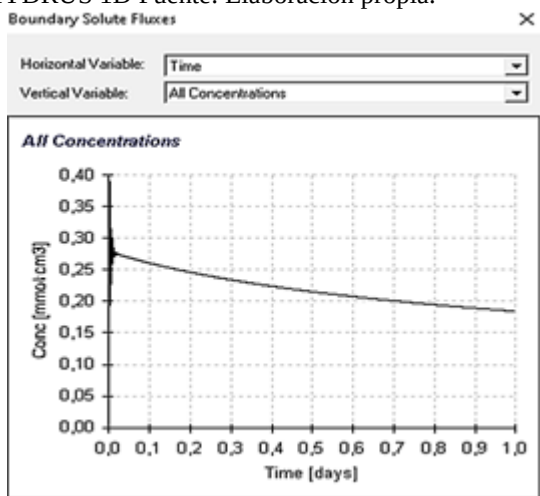
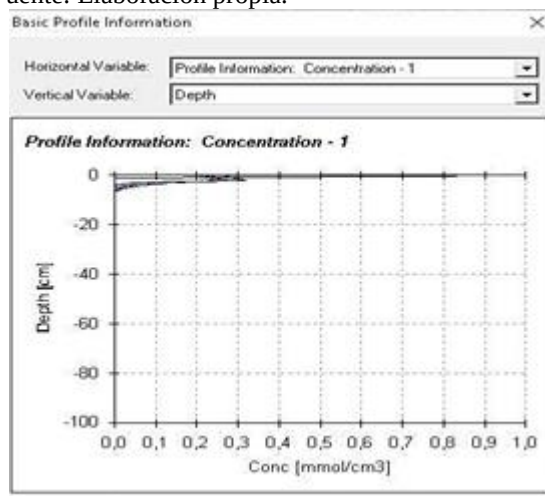


Figura 7. Avance del soluto software HYDRUS 1D Fuente: Elaboración propia.



Por otro lado, tenemos la gráfica de avance del soluto (figura 7), donde en el eje (y) se representa la profundidad en cm, y en el eje (x) se muestra la concentración del soluto. Se puede observar que en los primeros 2 centímetros la concentración no disminuye significativamente; sin embargo, después de los 2 centímetros de profundidad, la concentración disminuye de manera significativa hasta llegar a 0 mmol/cm³ a una profundidad de 7 centímetros.

Es importante destacar que este estudio se realizó en el suelo de Aquitania, el cual tiene una estructura franco arenosa, por lo que los resultados obtenidos son específicos para este tipo de suelo. Para el estudio de otros suelos con estructuras diferentes, es probable que los resultados varíen. Por

tanto, al analizar otros suelos, es necesario considerar las características específicas de cada uno para obtener resultados precisos y relevantes.

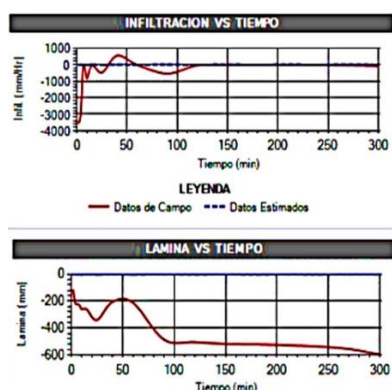
Para la recopilación de datos en este estudio, se analizaron muestras de suelo de varias fincas ubicadas en la vereda Suse de Aquitania, Boyacá. A partir de los datos obtenidos, se calculó el promedio y estos fueron los resultados obtenidos:

Cuadro 1. Promedio datos de estudio tiempo acumulado, Nivel de agua. Fuente: Elaboración propia.

TIEMPO ACUMULADO (min)	NIVEL DE AGUA (cm)
0,00	0
2,00	27,46
4,00	37,11
6,00	37,92
8,00	38,71
10,00	41,46
15,00	41,83
25,00	49,77
40,00	36,17
60,00	36,80
90,00	37,70
120,00	39,48
150,00	40,9
180,00	41,22
210,00	41,95
240,00	42,99
270,00	44,76
300,00	48,77

Se utilizó el modelo y el software Kostiakov para calcular la velocidad de infiltración y la lámina del suelo, con el objetivo de relacionar estos resultados con los obtenidos mediante el modelo de HYDRUS 1D. Para ello, se empleó la técnica de regresión lineal simple (RLS) seleccionando los valores de infiltración encontrados en campo con base en el coeficiente de determinación (R^2) y la representatividad de dichos valores. Esto permitió sugerir la variabilidad de las propiedades hidráulicas del suelo en estudio.

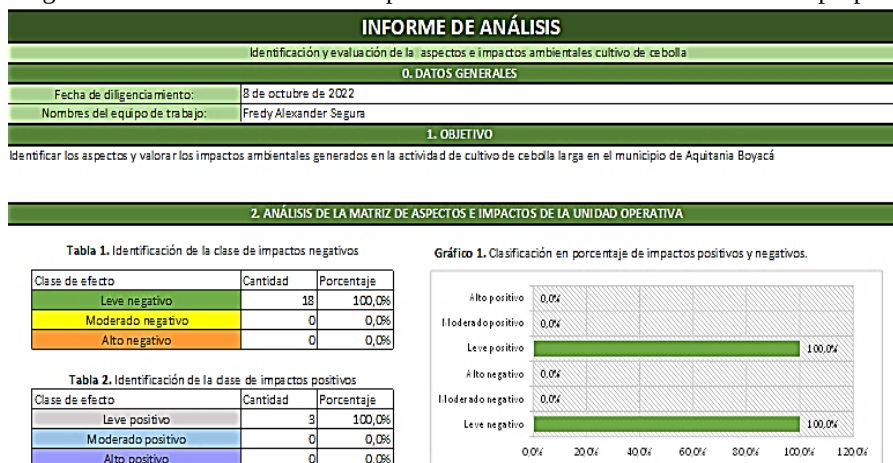
Figura 8. Infiltración (mm/h) vs tiempo(minutos) y Lámina(mm) vs tiempo (minutos). uso de Software KOSTIAKOV.
Fuente: Elaboración propia.



Como respuesta al manejo del software Kostiakov se obtienen las gráficas de infiltración (mm/h) vs tiempo(minutos) y Lámina(mm) vs tiempo (minutos) (figura 8). Donde se analiza que antes del minuto 40, la infiltración vs. tiempo mostraba una relación constante y proporcional, donde a medida que aumentaba el tiempo, también lo hacía la lámina de infiltración en centímetros. Sin embargo, después del minuto 40, se observó un cambio en el patrón, ya que la lámina de infiltración disminuyó en lugar de aumentar. Este cambio indica que, en ese momento, todos los espacios del suelo se llenaron de agua, es decir, se saturó y generó encharcamiento, aunque esta situación solo duró unos minutos. Posteriormente, la infiltración continuó, pero esta vez con una menor velocidad. Este análisis revela cómo el suelo responde a las condiciones de saturación y cómo afecta el proceso de infiltración, donde la velocidad de infiltración (mm/h) muestra un comportamiento típicamente decreciente en el tiempo.

Durante la investigación, se llevó a cabo la identificación y valoración de los impactos ambientales derivados de la actividad de cultivo de cebolla larga en el municipio. Como resultado (Figura 9), se identificaron un total de 18 impactos leves negativos y 3 impactos leves positivos en la zona de estudio.

Figura 9. Análisis de Matriz de impactos ambientales Fuente: Elaboración propia.



Se observa que la valoración de los impactos negativos, muestra que el 100% de ellos corresponden al rango de leves negativos. Esto indica que estos impactos no generan alteraciones considerables sobre el recurso ambiental y son fácilmente recuperables, permitiendo la aplicación de medidas preventivas para su mitigación.

Por otro lado, los impactos clasificados como moderados negativos representan un 0%. Esto significa que estos impactos tienen consideraciones de magnitud media y pueden ser recuperables a corto plazo, por lo que es necesario implementar medidas de mitigación para abordarlos.

En cuanto a los impactos altos negativos, también se registró un 0%. Estos impactos se caracterizan por su duración a largo plazo, presentando una mayor probabilidad de ocurrencia. Su retorno a condiciones similares a las iniciales requiere un tiempo prolongado y la implementación de medidas correctivas y/o de compensación.

Finalmente, los impactos moderados positivos representan el 0%. Esto indica que se están llevando a cabo acciones que repercuten más a mediano plazo y se presentan con mayor frecuencia dentro de las unidades operativas.

Estos resultados indican que los impactos negativos detectados no generan alteraciones significativas sobre el recurso ambiental, y debido a su naturaleza leve, tienen la capacidad de recuperarse rápidamente. Además, es importante destacar que se pueden aplicar medidas de prevención para mitigar y minimizar estos impactos, contribuyendo así a una gestión más sostenible y responsable de la actividad agrícola en la región.

4 CONCLUSIONES

El estudio realizado en el municipio de Aquitania, Boyacá, permitió identificar y valorar los impactos ambientales generados por el cultivo de cebolla larga en la zona de estudio. En total, se registraron 18 impactos negativos leves y 3 impactos positivos leves. Estos resultados sugieren que los impactos negativos observados no son lo suficientemente graves como para generar alteraciones significativas en los recursos ambientales de la zona, y que la capacidad de recuperación de estos impactos es rápida. Aunque se observa una afectación mínima, es crucial mantener un monitoreo continuo y adoptar medidas preventivas y correctivas para asegurar la sostenibilidad a largo plazo del cultivo de cebolla larga en la región.

Uno de los principales desafíos de la presente investigación fue la muestra limitada de suelos utilizada para evaluar los efectos de los agroquímicos. El tamaño reducido de la muestra y su concentración en una región específica pueden haber afectado la representatividad de los resultados. La diversidad de tipos de suelos, que puede influir significativamente en la retención y descomposición de los plaguicidas, no se abordó adecuadamente. Esto sugiere que las conclusiones

obtenidas en este estudio podrían no ser completamente aplicables a otras regiones con diferentes características edáficas. Además, la simulación de condiciones controladas en un laboratorio no logra replicar completamente las variables ambientales del campo, como las fluctuaciones estacionales, las precipitaciones y las interacciones entre diferentes agentes biológicos del suelo. La falta de datos longitudinales también limita la capacidad para evaluar los efectos a largo plazo de los agroquímicos, especialmente en términos de la acumulación de residuos químicos o los cambios en la microbiota del suelo.

En cuanto a la valoración de los impactos, la mayoría de los efectos fueron de naturaleza leve negativa, lo que es un indicio positivo. Sin embargo, es fundamental seguir monitoreando la situación y tomar decisiones estratégicas que promuevan un manejo ambiental adecuado. La implementación de estrategias de gestión sostenible podría mitigar incluso los impactos menores y garantizar que el cultivo se lleve a cabo de manera ambientalmente responsable.

Adicionalmente, se utilizó un enfoque descriptivo para interpretar los patrones de uso de agroquímicos en el suelo, seleccionando los compuestos con mayor concentración para la modelación del transporte de solutos. Los resultados obtenidos sobre la concentración de agroquímicos en el suelo serán clave para implementar estrategias correctivas, como la reducción de los componentes que superan los límites permitidos y la recuperación de los suelos degradados.

La modelación hidrológica realizada mediante el software HYDRUS 1D proporcionó información crucial sobre la conductividad hidráulica y los parámetros de flujo de agua en el suelo. Además, se lograron determinar los parámetros de transporte de solutos específicos para cada agroquímico, así como los coeficientes de adsorción necesarios para realizar simulaciones precisas de la movilidad de estos productos en el suelo.

El análisis de la distribución de los agroquímicos mediante puntos de control estratégicamente ubicados permitió comprender mejor el comportamiento de los solutos en el suelo, así como su interacción con las propiedades físico-químicas del suelo a lo largo del tiempo y la profundidad. Este análisis es esencial para llevar a cabo una modelación precisa y confiable de los efectos del uso de agroquímicos.

Finalmente, para proyectos futuros con características similares, se recomienda elegir áreas con mínima intervención humana dentro del área de estudio. Utilizar estas zonas como línea base permitirá crear un comparativo detallado que facilite la evaluación de los cambios en el suelo, contribuyendo así a un manejo más adecuado y a la identificación temprana de los efectos de un uso inadecuado o de la sobreexplotación de los recursos del suelo.

Para futuras investigaciones en este campo, es crucial ampliar la muestra y considerar una mayor diversidad de suelos, tanto en términos de características físico-químicas como biológicas.

La inclusión de suelos representativos de diferentes regiones geográficas permitirá obtener una visión más holística de cómo los agroquímicos afectan la salud del suelo en distintos contextos. Además, se recomienda realizar estudios a largo plazo para observar los efectos acumulativos de los agroquímicos sobre la estructura y funcionalidad del suelo. La duración prolongada de los estudios permitirá evaluar los impactos a largo plazo en la regeneración de la microbiota y la retención de contaminantes. A su vez, sería pertinente explorar otros agroquímicos, como fungicidas, herbicidas y fertilizantes, que también juegan un papel crucial en la agricultura moderna y que podrían tener efectos diferentes en la dinámica del suelo. En este sentido, sería valioso también investigar la interacción entre diversos agroquímicos, ya que el uso simultáneo de productos químicos podría tener sinergias o efectos antagonistas que afecten la calidad del suelo de manera compleja.

CONFLICTO DE INTERESES

El artículo no presenta conflicto de intereses

REFERENCIAS

- Johnson, R. A., & Smith, T. J. (2020). Impacts of Pesticides on Soil. In R. P. Lemus, S. K. Gowda, J. D. Holman, & J. A. Morgan (Eds.), *Advances in Soil and Water Conservation* (pp. 57-68). CRC Press. Disponible en: <https://www.crcpress.com>
- Gomez, S., & Pérez, F. (2021). Estado actual de los efectos de los pesticidas en el medio ambiente, la salud humana y la biodiversidad. National Institute of Environmental Health Sciences. Disponible en https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9428564/?utm_source=chatgpt.com
- Zhang, Y., Li, X., & Wang, S. (2020). *Impact of agrochemicals on soil health. Environmental Science and Pollution Research*, 27(5), 4992-5002. Disponible en <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08093-2>
- Goyhenetche, N. (2022). Aportes a un estudio ambiental preliminar de la zona conocida como “El Tragadero”, Fray Marcos, Florida, Uruguay: Preliminar environmental study of the “El Tragadero” área, Fray Marcos, Florida, Uruguay. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, 5(5), 89–101. Disponible en <https://doi.org/10.34188/bjaerv5n5-006>
- Fernández, A., & Martínez, J. O. (2020). Impacto de la agricultura intensiva en la calidad del suelo en España. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 21(3), 1-16. Disponible en <https://doi.org/10.33132/01228121X.1560>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2020). Pesticide use in agriculture: FAOSTAT database. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/RP>
- Gomez, M. D., & Perez, F. R. (2017). Evaluación de la contaminación por nitratos en zonas agrícolas de la región de Murcia. *Revista de Estudios Ambientales*, 45(2), 234-245. <https://doi.org/10.15332/s2256-3202.2017.0002.01>
- Jaramillo, J., & Bahamón, M. (2018). Evaluación de la incidencia del agroecosistema de cebolla sobre la degradación del suelo mediante la respiración edáfica como un indicador biológico en la cuenca del Lago de Tota, Aquitania - Boyacá. Universidad de la Salle. https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1763&context=ing_ambiental_sanitaria
- Gowda, J. D., Holman, J., & Morgan, J. A. (Eds.). (2019). *Advances in soil and water conservation* (pp. 57-68). CRC Press. <https://www.crcpress.com/Advances-in-Soil-and-Water-Conservation/Gowda-Holman-Morgan/p/book/9780367330321>
- López, B., & Sánchez, P. (2018). Modelos de simulación de contaminantes en suelos agrícolas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(7), 1453-1465. <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i7.1478>
- Martínez, M., Aldana, M., & Guerrero, J. (2014). Modelación matemática del transporte de oxadixyl en suelos de cultivo de cebolla. *Ambiente & agua - An interdisciplinary journal of Applied Science*. <https://www.scielo.br/j/ambiagua/a/6vthwTp5CQD6LRG7smNzdMn/?format=pdf&lang=es>
- Martínez, L. M., Silva, R. B., Oliveira, R. F., Andrade, L. M., & Santos, C. (2019). Evaluation of Pesticide Residues in Soils of Agricultural Areas in Brazil. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(7), 1245. <https://doi.org/10.3390/ijerph16071245>
- Mora, E. (2021). Análisis de alternativas para la reducción de la concentración de contaminantes en la zona no saturada del suelo, mediante modelación numérica con el software unidimensional

HIDRUS 1D [Tesis de maestría, Universidad Católica de Colombia]. Repositorio Institucional de la Universidad Católica de Colombia. https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/27179/1/TG_507661_Mora..pdf

Morales, C. G. (2020). Frambueso: consideraciones para un exitoso establecimiento del cultivo. Boletín INIA - Instituto de Investigaciones Agropecuarias, N° 432. Retrieved. <https://hdl.handle.net/20.500.14001/67460>.

Morales, P., & Quiñones, A. (2022). Uso de tecnologías de información geográfica para la gestión de suelos agrícolas. Journal of Advanced Research in Geography and Geology, 5(1), 15-29. <https://www.ipeejournal.org/volume5/issue1/3.pdf>

Navarro, F. J., & Hernández, M. (2019). El impacto del riego sobre la degradación del suelo en áreas de cultivo. Ciencia e Ingeniería Neogranadina, 29(2), 77-89. <https://revistas.unimilitar.edu.co/index.php/rcin/article/view/3710>

Ríos, S. L. (2019). Prácticas de uso de agroquímicos y disposición de recipientes en sistemas de producción agrícola: caracterización de hábitos y estimación de factores explicativos en Aquitania Boyacá. <http://hdl.handle.net/10554/46588>

Rubio, Vallejo. (2014). Evaluación del grado de contaminación por plaguicidas organofosforados en cultivos de cebolla (*Allium fistulosum*) en suelo y agua de escorrentía en el corregimiento de la Florida de la ciudad de Pereira. Universidad Tecnológica de Pereira. <https://hdl.handle.net/11059/4537>

Smith, J. L., Collins, H. P., Bailey, V. L., & Bolton, H. (2018). Microbial interactions with agrochemicals in soil. Soil Biology and Biochemistry, 120, 116-126. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.03.024>

Tesaurus Ambiental para Colombia. (s. f.). Recuperado de http://www.invemar.org.co/redcostera1/invemar/docs/tesauro_ambiental/naveg.htm

Trigueros, R. (2009). El uso de la modelación en la enseñanza de las matemáticas. Instituto Politécnico Nacional México. <https://www.redalyc.org/pdf/1794/179414894008.pdf>

Vivas, A. (2020). Agrochemicals and Their Impact on Soil Ecosystems. In S. Das & R. N. Kumar (Eds.), Ecological Impacts of Toxic Chemicals (pp. 209-223). Springer. <https://www.researchgate.net/publication/354461371>

Anexos

Anexo 1. Porcentaje de recuperación de suelo para los plaguicidas

Compuesto	Porcentaje de recuperación Suelo (%)
1.Dichlorvos	77.44
3.Demeton O & S	32.00
9.Methyl parathion	12.52
10.Fenchlorphos (Ronnel)	22.94
11. Fenthion	33.47
13. Trichloronate	43.26
14. Merphos	74.45
19.Azinphos methyl (guthion)	37.97

Anexo 2. Cálculo de información, parámetros y balance de masas en HYDRUS 1D.

Hydrus-1D Calculation: Transporte_de_agroquímicos

0.0128	1	14-0.13E+04-0.16E+02	0.00E+00-0.45E-03	1.0	0.	-100.			
0.0167	1	15-0.13E+04-0.21E+02	0.00E+00-0.59E-03	1.0	0.	-100.			
0.0218	1	16-0.13E+04-0.28E+02	0.00E+00-0.78E-03	1.0	0.	-100.			
0.0287	1	17-0.13E+04-0.37E+02	0.00E+00-0.10E-02	1.0	0.	-100.			
0.0378	1	18-0.13E+04-0.48E+02	0.00E+00-0.13E-02	1.0	0.	-100.			
0.0492	1	19-0.13E+04-0.63E+02	0.00E+00-0.17E-02	1.0	0.	-100.			
0.0663	1	20-0.13E+04-0.84E+02	0.00E+00-0.24E-02	1.0	0.	-100.			
Time	ItW	ItCum	vTop	SvTop	SvRoot	SvBot	hTop	hRoot	hBot
0.0833	1	21-0.13E+04-0.11E+03	0.00E+00-0.30E-02	1.0	0.	-100.			
0.1042	1	22-0.13E+04-0.13E+03	0.00E+00-0.37E-02	1.0	0.	-100.			
0.1250	1	23-0.13E+04-0.16E+03	0.00E+00-0.44E-02	1.0	0.	-100.			
0.1667	1	24-0.13E+04-0.21E+03	0.00E+00-0.59E-02	1.0	0.	-100.			
0.2083	1	25-0.13E+04-0.27E+03	0.00E+00-0.74E-02	1.0	0.	-100.			
0.2500	1	26-0.13E+04-0.32E+03	0.00E+00-0.89E-02	1.0	0.	-100.			
0.2917	1	27-0.13E+04-0.37E+03	0.00E+00-0.10E-01	1.0	0.	-100.			
0.3333	1	28-0.13E+04-0.42E+03	0.00E+00-0.12E-01	1.0	0.	-100.			
0.4167	1	29-0.13E+04-0.53E+03	0.00E+00-0.15E-01	1.0	0.	-100.			
0.5000	1	30-0.13E+04-0.64E+03	0.00E+00-0.18E-01	1.0	0.	-100.			
0.5833	1	31-0.13E+04-0.74E+03	0.00E+00-0.21E-01	1.0	0.	-100.			
0.6667	1	32-0.13E+04-0.85E+03	0.00E+00-0.24E-01	1.0	0.	-100.			
0.7500	1	33-0.13E+04-0.96E+03	0.00E+00-0.27E-01	1.0	0.	-100.			
0.8333	1	34-0.13E+04-0.11E+04	0.00E+00-0.30E-01	1.0	0.	-100.			
0.9167	1	35-0.13E+04-0.12E+04	0.00E+00-0.33E-01	1.0	0.	-100.			
1.0000	1	36-0.13E+04-0.13E+04	0.00E+00-0.35E-01	1.0	0.	-100.			

Run time [sec] 0.190000027418137
Calculations have finished successfully.
Press Enter to continue

Fuente: Elaboración propia

Anexo 3. Tabla resultados de la velocidad de infiltración y la lámina del suelo.

TIEMPO ACUMULADO (min)	NIV. DEL AGUA (cm)	NIV. RECUPERACIÓN AGUA (cm)	LÁMINA INFILTRADA (mm)	LÁMINA ACUMULADA (mm)	VELOCIDAD D INFILTRADA (mm/Hr)	Log (Tiempo)
0	0		0	0		
2	27,5		-118	-118	-3540	0,6931
4	37,1		-96	-214	-2880	13.863
6	37,9		-8	-222	-240	17.918
8	38,7		-8	-230	-240	20.794
10	41,5		-28	-258	-840	23.026
15	41,8		-3	-261	-36	27.081
25	49,8		-80	-341	-480	32.189
40	36,2		136	-205	544	36.889
60	36,8	10,2	-6	-211	-18	40.943
90	37,7		-275	-486	-550	44.998
120	39,5		-18	-504	-36	47.875
150	40,9		-14	-518	-28	50.106
180	41,2		-3	-521	-6	51.930
210	42		-8	-529	-16	53.471

Fuente: Elaboración propia