



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

SELECCIÓN DE UN COLORANTE PARA LA EVALUACIÓN DE RUTAS DE FLUJO PREFERENCIAL DE AGUA EN SUELOS DEL VALLE DEL MEZQUITAL

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
B I Ó L O G O
P R E S E N T A:

JIMÉNEZ ROBLES JOSÉ LUÍS

DIRECTORA: Dra. BLANCA LUCIA PRADO PANO

CO-DIRECTORA: Dra. ESTHER MATIANA GARCÍA AMADOR.



México; D.F. MARZO 2011

Investigación realizada con financiamiento del CONACYT
Número 99964 y del proyecto PAPIIT IN116310



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Dedicatoria

La siguiente tesis presentada para la obtención del grado de licenciatura de biólogo es dedicada para esas personas que de forma directa influyeron en mi vida personal y profesional, este es el trabajo final por el que tanto se luchó y el éxito es compartido con ustedes.

A mi madre Robles García Senorina, a mi padre Jiménez López Rosalino, mis hermanos Jiménez Robles Heladio, Jiménez Robles Miguel Alejandro, Jiménez Robles Jorge y Jiménez Robles Adrian.

A mi esposa Biól. Flores Sánchez Liliana Anais e hijos Ián Uriel C. Flores y “mory” Jiménez Flores.

A mi directora de tesis Dra. Prado Pano Blanca Lucia.

A mi asesora interna de tesis Dra. García Amador Esther Matiana.

A todos y cada uno de mis amigos y amigas, compañeros, colegas, que compartieron conmigo la formación profesional, el gusto por una carrera que comprende la creación más hermosa de dios: la vida

“Jamás habría tenido éxito en la vida
si no hubiera prestado a la cosa más pequeña de
que me ocupé la misma atención y cuidado que
puse en la más importante”
Charles Dickens

El objetivo de nuestra vida no es superar a los
demás, sino superarnos a nosotros mismos.
S Johnson

No hay educación sin auto educación para la cual es
necesario el esfuerzo personal, una buena
educación es el manantial y la raíz de una vida
virtuosa.
Miguel Ángel Gómez

“No te angusties por el peso de un ayer que ya no
existe; tampoco temas por un mañana que quizás
no vas a ver.
El ayer ya pasó... el mañana no ha llegado.
Goza pues el hoy que tienes en tus manos”
San Mateo

El hombre sabio, incluso cuando calla,
dice más que el necio cuando habla.
Thomas Fuller

Los mejores logros se obtienen cuando permites
que la vida te muestre el camino, los mejores
fracasos los encuentras cuando pierdes el camino.

Permite que la fe te guíe, ya que la fe es fuente de
luz y esperanza.
Jois, until the eternity

Agradecimientos

Para dar las gracias por este trabajo es necesario primero dar las gracias a dios por permitirme vivir el sueño de la vida terrenal, por marcarme como propósito de vida el estudiar y comprender su más grande creación, la vida.

A mi madre, que con sus sacrificios logro hacer de esta oveja descarriada un hombre profesionalista, mil gracias mama sin ti no lo hubiera logrado.

A mi padre por confiar en mí y brindarme tu apoyo aun cuando nos distancias miles de kilómetros, este es el fruto de tu esfuerzo.

Mis hermanos que fueron y seguirán siendo parte esencial de mí existir, recuerden que en mí siempre pueden contar como yo conté con ustedes para realizar mi meta profesional.

A mi esposa por ser mi brújula en este mar de la vida, por motivarme a crecer como humano y como profesionalista, por tu apoyo y sacrificio en la realización de la tesis, por creer en mi incondicionalmente aun en los peores momentos, por no permitir que abandonara mis sueños, lo hemos logrado pues este trabajo también es tuyo.

A mis hijos por existir y ser el motor de mi vida, por ustedes y para ustedes es esta tesis, la siembra ya dio frutos es hora de cosechar juntos, los amo.

A la Dra. Blanca L. Prado, por confiar en mí y brindarme todo el apoyo necesario en la realización de esta tesis, gracias por darme la satisfacción de titularme, gracias por abrirme la puerta de su sabiduría.

A la Dra. Esther M. García, por sus consejos y su apoyo en la elaboración de esta tesis, por ayudarme en mi preparación como profesionalista y por confiar en mí, me llevo un poco de gran sabiduría pero sobre todo de su amistad.

A la Biól. Carolina por todo el apoyo otorgado en la realización de esta tesis, gran parte está hecha por tu ayuda.

A la Dra. Lucy Mora por su apoyo para la realización de esta tesis, por permitir trabajar en las instalaciones de su laboratorio.

A mis sinodales de examen profesional, porque con su conocimiento y experiencia en el campo de la edafología enriquecieron esta tesis.

A todos y cada uno de mis profesores que a lo largo de mi carrera me ayudaron en la formación como biólogo, la transmisión de su conocimiento y su dedicación están reflejados en esta tesis y en la obtención del grado como biólogo.

Agradezco a las personas que tuvieron que ver a lo largo de mi carrera compañeros, amigos, enemigos, personas que confiaron en mí, que tuvieron una buena palabra de aliento para ofrecerme

A mis amigos, colegas y compañeros de los cuales les brindo agradecimiento especial a: Biól. Ismael Cruz Pérez, Biól. Rodolfo Santiago Basilio, Lic. Raúl I. Torres Hernández, Biól. Juan Carlos Contreras Peréa, Biól. Sergio Reyes Zavala, Biól. Oscar Hernández Guzmán, Biól. Dulce María Estrada Millán, Biól. Beyibeth Domínguez Bernal, Biól. Blanca Castillo Olivares, Fabiola Castillo Magil, Psic. Alejandro "picachu", Mauricio Bribiescas, Biól. Roció "chío dulces", Gaby "chocho-

fresa”, Biól. Diana Espinoza Elizaga, Dra. Socorro Orozco, Biól. Raquel Báez, Biól. Janet Pérez Cruz, Biól. Cintia Díaz, Biól. Cintia Vargas, Biól. Elvia García, Biól. Miguel Castillo, Biól. Rebeca Jiménez, Biól. Ivonne Vilchis, Salwa Najera, Biól. Stacy Hernández, Citlali Yessica Hernández, Biól. Alba Rodríguez, Biól. Marlene Esquivel, Biól. Eloy Tito García Arias, Fernando Rivera, Jesús Ramírez, Eudy Ascencio, Armando Vargas,

Al Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México, por permitirme desarrollar mi proyecto de tesis en sus instalaciones, el fruto de está es para beneficio del mismo instituto.

A la Dra. Christina Sibe, y al Laboratorio de Edafología Ambiental del Instituto de Geología (LEA)

A la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, por dejarme cumplir un sueño, el estudiar una carrera en sus aulas fue la mejor decisión de mi vida como universitario, lo obtención de esta tesis es parte del trabajo de preparación recibida por profesores de gran desarrollo.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por darme la mejor herencia en vida, por darme la oportunidad de ser orgullosamente universitario, y hoy en día por ser biólogo, el apoyo recibido esta reflejado con el otorgamiento del grado.



Juntos hasta el final, FES Zaragoza, UNAM



Biól. José Luis Jiménez R.

*CDJ, JIRL G.
JOIS, UNTIL THE ETERNITY*

ÍNDICE TEMÁTICO

	Págs.
Índice temático	I
Índice de figuras	III
Índice de cuadros	IV
I Introducción	1
II Marco Teórico	3
II.1 El suelo	3
II.2 Conductividad hidráulica, <i>K</i>	3
II.3 Porosidad del suelo	3
II.4 Flujos preferenciales	4
II.5 El uso de trazadores del agua en los experimentos de transporte de solutos	4
II.6 El riego con aguas residuales crudas.	5
II.6.1 Transporte rápido de agua y solutos en el suelo: flujo preferencial	5
III Descripción De La Zona Estudio	6
III.1 El Valle Del Mezquital.	6
III.1.1 Localización	6
III.1.2 Rasgos físicos	6
III.1.2.1 Tipo climático	6
III.1.2.2 Temperatura	7
III.1.2.3 Precipitación	7
III.1.3 Hidrología	7
III.1.3.1 Láminas de riego	7
III.1.4 Geología	8
III.1.5 Geomorfología	8
III.1.5.1 Relieve	8
III.1.5.2 Suelos	8
III.1.6 Vegetación	9
III.2 Rancho Las Palmas	9
IV Planteamiento Del Problema	11
V Objetivos E Hipótesis	12
V.1 Objetivo General	12
V.1.1 Objetivos Particulares	12
V.2 Hipótesis	12
Capítulo VI: Colorante Piranina	
VI.1 Metodología Piranina	13
VI.1.1 Características del colorante	13
VI.1.2. Procedimiento de extracción de la piranina del suelo	13
VI.2 Análisis Y Discusión De Los Resultados Piranina	15
VI.2.1. Tratamiento 1	15
VI.2.2. Tratamiento 2	16
VI.2.3. Tratamiento 3	17
VI.2.4. Tratamiento 4	19
VI.2.5. Tratamiento 5	21
Capítulo VII: Colorante Fluorescein	
VII.1 Metodología Fluorescein (Degradación)	24
VII.1.1 Descripción Del Colorante:	24
VII.1.2 Evaluación De La Degradación En Agua Y En Suelo	24

	VII.1.2.1. Evaluación De La Degradación Del Colorante En El	25
Suelo		
	VII.1.2.2. Evaluación De La Degradación Del Colorante En	25
Solución		
	VII.2. Análisis Y Discusión De Los Resultados Fluorescein (Degradación)	26
	VII.2.1 Degradación De Fluorescein En La Mezcla Suelo-Colorante.	28
	<i>VII.2.1.1 Intensidad</i>	28
	<i>VII.2.1.2 Brillo</i>	31
	<i>VII.2.1.3 Fluorescencia</i>	33
	VII.2.2 Degradación De Fluorescein En Solución.	37
	<i>VII.2.2.1 Intensidad</i>	37
	<i>VII.2.2.2 Brillo</i>	40
	<i>VII.2.2.3 Fluorescencia</i>	42
	VII.3 Metodología Fluorescein (Análisis Del Flujo Preferencial De Agua En	46
Columnas De Suelo)		
	VII.3.1 Extracción De Monolitos	46
	VII.3.2 Montaje, Aplicación Del Riego De Una Solución De Colorante Y	49
Corte De Las Columnas		
	VII.3.2.1 El colorante utilizado	49
	VII.3.2.2 Cuchilla de cortes	49
	VII.4. Análisis Y Discusión De Los Resultados Fluorescein (Análisis Del Flujo	52
Preferencial De Agua En Columnas De Suelo).		
	VII.4.1 Variables Evaluadas	52
	VII.4.2 Resultados	52
	VII.4.2.1 Columna 1	52
	VII.4.2.2 Columna 2	55
	VII.4.2.3 Columna 3	56
	VII.4.2.4 Columna 4	57
	VII.4.2.5 Columna 5	58
VIII. Conclusiones		60
IX. Referencias		62

ÍNDICE DE FIGURAS

	Págs.
<i>Figura III.1. Plano de localización del Valle del Mezquital.</i>	6
<i>Figura VI.2. Gráfica obtenida en el tratamiento 1, realizada a 402 nm.</i>	15
<i>Figura VI.3. Gráfica obtenida en el tratamiento 2, realizada a 402 nm.</i>	16
<i>Figura VI.4. Gráfica obtenida en el tratamiento 3, realizada a 370 nm.</i>	17
<i>Figura VI.5. Gráfica obtenida en el tratamiento 3, realizada a 402 nm.</i>	18
<i>Figura VI.6. Gráfica obtenida en el tratamiento 3, realizada a 410 nm.</i>	18
<i>Figura VI.7. Gráfica obtenida en el tratamiento 4, realizada a 370 nm.</i>	19
<i>Figura VI.8. Gráfica obtenida en el tratamiento 4, realizada a 402 nm.</i>	20
<i>Figura VI.9. Gráfica obtenida en el tratamiento 4, realizada a 410 nm.</i>	20
<i>Figura VI.10. Gráfica obtenida en el tratamiento 5, realizada a 370 nm.</i>	21
<i>Figura VI.11. Gráfica obtenida en el tratamiento 5, realizada a 402 nm.</i>	22
<i>Figura VI.12. Gráfica obtenida en el tratamiento 5, realizada a 410 nm.</i>	22
<i>Figura VII.13. Imagen tomada el día 1 (26 de agosto), evidenciando una coloración intensa de las mezclas.</i>	28
<i>Figura VII.14. Gráfica elaborada con la comparación de la intensidad entre concentraciones de la mezcla suelo-colorante, almacenadas a una temperatura de 20 °C.</i>	29
<i>Figura VII.15. Gráfica elaborada con la comparación de la intensidad entre concentraciones de la mezcla suelo-colorante, almacenadas a una temperatura < 5 °C.</i>	29
<i>Figura VII.16. Gráfica elaborada con la comparación de la intensidad entre mezclas suelo-colorante de tres concentraciones, a dos temperaturas de almacenamiento: 20 °C versus < 5 °C.</i>	30
<i>Figura VII.17. Imagen representativa del brillo evaluado en las mezclas de suelo-colorante.</i>	31
<i>Figura VII.18. Gráfica elaborada con la comparación del brillo entre concentraciones de la mezcla suelo-colorante, almacenadas a una temperatura de 20 °C.</i>	31
<i>Figura VII.19. Gráfica elaborada con la comparación del brillo entre concentraciones de la mezcla suelo-colorante, almacenadas a una temperatura < 5 °C.</i>	32
<i>Figura VII.20. Gráfica elaborada con la comparación del brillo entre mezclas suelo-colorante de tres concentraciones, a dos temperaturas de almacenamiento: 20 °C versus < 5 °C.</i>	32
<i>Figura VII.21. Imagen tomada bajo excitación de luz UV emitida por una lámpara de luz negra, para resaltar la fluorescencia del colorante en la mezcla suelo-colorante.</i>	33
<i>Figura VII.22. Gráfica elaborada con la comparación de la fluorescencia entre concentraciones de la mezcla suelo-colorante, almacenadas a una temperatura de 20 °C.</i>	33
<i>Figura VII.23. Gráfica elaborada con la comparación de la fluorescencia entre concentraciones de la mezcla suelo-colorante, almacenadas a una temperatura < 5 °C.</i>	34
<i>Figura VII.24. Gráfica elaborada con la comparación de la fluorescencia entre mezclas suelo-colorante de tres concentraciones, a dos temperaturas de almacenamiento: 20 °C versus < 5 °C.</i>	35
<i>Figura VII.25. Gráfica elaborada de la fluorescencia en la mezcla suelo-colorante de 5 gL⁻¹, a dos temperaturas de almacenamiento: 20 °C versus 5 °C.</i>	35
<i>Figura VII.26. Imagen tomada el 26 de agosto, colorante en solución a tres concentraciones.</i>	37
<i>Figura VII.27. Gráfica elaborada con la comparación de la intensidad entre concentraciones del colorante en solución, almacenadas a una temperatura de 20 °C.</i>	38
<i>Figura VII.28. Gráfica elaborada con la comparación de la intensidad entre concentraciones del colorante en solución, almacenadas a una temperatura < 5 °C.</i>	38
<i>Figura VII.29. Gráfica elaborada con la comparación de la intensidad entre soluciones de tres concentraciones, a dos temperaturas de almacenamiento: 20 °C versus < 5 °C.</i>	39
<i>Figura VII.30. Gráfica elaborada con la comparación del brillo entre concentraciones del colorante en solución, almacenadas a una temperatura de 20 °C.</i>	40
<i>Figura VII.31. Gráfica elaborada con la comparación del brillo entre concentraciones del colorante en solución, almacenadas a una temperatura < 5 °C.</i>	40
<i>Figura VII.32. Gráfica elaborada con la comparación del brillo entre soluciones de tres concentraciones, a dos temperaturas de almacenamiento: 20 °C versus < 5 °C.</i>	41
<i>Figura VII.33. Imagen representativa de fluorescencia bajo luz negra en concentraciones 1, 5 y 10 gL⁻¹.</i>	42
<i>Figura VII.34. Gráfica elaborada con la comparación de la fluorescencia entre concentraciones del colorante en solución, almacenadas a una temperatura de 20 °C.</i>	43
<i>Figura VII.35. Gráfica elaborada con la comparación de la fluorescencia entre concentraciones del colorante en solución, almacenadas a una temperatura < 5 °C.</i>	43
<i>Figura VII.36. Gráfica elaborada con la comparación de la fluorescencia entre soluciones de tres concentraciones, a dos temperaturas de almacenamiento: 20 °C versus < 5 °C.</i>	44
<i>Figura VII.37. Gráfica elaborada de la fluorescencia en la solución de 5 gL⁻¹, a dos temperaturas de almacenamiento: 20 °C versus 5 °C.</i>	44
<i>Figura VII.38. Formación de un cubo con ayuda de un cuchillo, sobre un surco o canal de la siembra.</i>	46
<i>Figura VII.39. Tallado de monolito para darle la forma de un cilindro.</i>	47
<i>Figura VII.40. Columna de suelo (monolito) con molde de acero y espuma.</i>	48

<i>Figura VII.41. Monolito de suelo intacto acondicionado para su traslado y almacenaje.</i>	49
<i>Figura VII.42. Detalle del dispositivo de corte utilizado en el experimento.</i>	50
<i>Figura VII.43. Secuencia de imágenes que muestran el procedimiento de corte de las columnas una vez aplicada la lámina de riego con el colorante fluorescein.</i>	51
<i>Figura VII.44. Detalle del primer corte de la columna 1.</i>	53
<i>Figura VII.45. Detalle del segundo corte de la columna 1.</i>	54
<i>Figura VII.46. Detalle del tercer corte de la columna 1.</i>	55
<i>Figura VII.47. Detalle del corte de la columna 2.</i>	56
<i>Figura VII.48. Detalle del corte de la columna 3.</i>	57
<i>Figura VII.49. Detalle del corte de la columna 4.</i>	58
<i>Figura VII.50. Detalle del corte de la columna 5.</i>	59

ÍNDICE DE CUADROS

	Págs.
Cuadro III.1: Superficie regable por municipio.	7
Cuadro III.2. Lámina de riego en los distritos de riego 03 y 100.	8
Cuadro VI.3. Nomenclatura de la piranina.	13
Cuadro VI.4. Propiedades de la piranina.	13
Cuadro VI.5. Resumen de tratamientos evaluados para optimizar el protocolo de extracción de piranina. En negritas se resalta la variable evaluada en cada tratamiento.	14
Cuadro VI.6. Resultados del tratamiento 1.	15
Cuadro VI.7. Resultados del tratamiento 2.	16
Cuadro VI.8. Resultados del tratamiento 3.	17
Cuadro VI.9. Resultados del tratamiento 4.	19
Cuadro VI.10. Resultados del tratamiento 5.	21
Cuadro VII.11. Nomenclatura del fluorescein.	24
Cuadro VII.12. Propiedades del fluorescein.	24
Cuadro VII.13. Matriz de seguimiento en mezcla colorante-suelo.	26
Cuadro VII.14. Matriz de seguimiento del colorante en solución.	27
Cuadro VII.15. Nomenclatura.	27
Cuadro VII.16. Variables evaluadas en las columnas: tratamientos y periodos de reposo.	52

I INTRODUCCIÓN

La presencia de contaminantes en los mantos freáticos ha motivado que el transporte de solutos en el suelo sea un tema de interés científico. El transporte y retención del agua y contaminantes es afectado por las características del suelo y por los procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren entre el soluto y la matriz del suelo. De esta forma, encontramos numerosos estudios sobre el efecto que diversos factores tienen en el movimiento de solutos: el tipo de suelo y tipo de agricultura (Bejat *et al.*, 2000); el espesor del horizonte, la macroporosidad, la textura y la estructura del suelo (Strock *et al.*, 2001); la temperatura, la humedad, el pH, el contenido de materia orgánica y el tipo de arcillas del suelo (Müller y Duwig, 2007). La comprensión de los mecanismos de transporte de solutos en un medio poroso como los suelos, es esencial para comprender el impacto de estos sistemas sobre la calidad de las aguas superficiales y profundas. Las características de la red porosa del suelo son determinantes en el movimiento del agua y de solutos. La presencia de macroporos es uno de los factores más relevantes en la heterogeneidad del movimiento del agua y de solutos en el suelo (Poletika y Jury, 1994). Los esquemas de macroporosidad varían con el tipo de suelo, su morfología, las prácticas agrícolas y la actividad de la fauna del suelo; además los poros funcionales (que participan en el transporte) cambian según el contenido de agua y la intensidad de flujo (Andreini y Steenhuis 1990; Shipitalo *et al.*, 1990; Edwards *et al.*, 1992; Quinsenberry *et al.*, 1994, Prado *et al.*, 2008b).

El estudio de la estructura del suelo puede realizarse a varias escalas, nano, meso y micro. Existen además varias herramientas para lograrlo: modelos matemáticos, trazadores, secciones delgadas de suelo, tomógrafos, entre otros. En el Departamento de Edafología del Instituto de Geología de la UNAM, existen dos proyectos de investigación, uno financiado por el CONACYT en el marco del programa de apoyos para la Investigación en ciencia básica; y un segundo proyecto financiado por el Programa de apoyo a proyectos de investigación e innovación tecnológica (PAPIIT). En ambos proyectos se plantea estudiar la estructura del suelo y evaluar el efecto de la misma en el movimiento de agua y solutos en el suelo. Es en este contexto que se inserta la tesis que se presenta. El aporte de la tesis es proponer un colorante que pueda utilizarse como trazador del movimiento del agua, dicho trazador será utilizado por diferentes investigadores que participan en el proyecto: hidrólogos, edafólogos, microbiólogos y especialistas en análisis de imágenes. El estudio se hace a escala meso, en columnas de suelo, utilizando como herramienta un trazador del flujo, un colorante fluorescente que puede ponerse en evidencia en un suelo oscuro como el del Valle del Mezquital. El objetivo de la tesis es definir la viabilidad de un colorante para utilizarse como trazador de agua y solutos, en experimentos en columnas de suelo. Los resultados obtenidos en el trabajo de tesis constituyen información indispensable para el buen desarrollo de dos proyectos de ciencia básica del Instituto de Geología.

El documento de tesis se divide en IX capítulos. En el capítulo II se aborda de forma general el marco teórico alrededor de la temática del riesgo de contaminación de acuíferos debido a las características intrínsecas del suelo, la problemática asociada a la práctica de regar los campos agrícolas con agua residual cruda, así como el interés de usar trazadores de agua y solutos en el suelo. En el capítulo III se describe la zona en estudio, abordando las características edafológicas, rasgos físicos y geológicos del área. En el capítulo IV se plantea la problemática que existe en la zona de estudio, explicando el interés de realizar estudios que evalúen el riesgo de contaminación del manto freático. Los objetivos e hipótesis, son presentados en el capítulo V.

En el trabajo se evaluaron dos colorantes para utilizarse como trazadores del flujo de agua en el suelo oscuro del Valle del Mezquital, la piranina (*pyranine*) y el fluoresceín (*fluoresceine*). El primero siendo un trazador de flujo de agua ya utilizado en estudios similares por el grupo de trabajo en el que se desarrolló la tesis, por lo tanto, se dio énfasis en el desarrollo de una metodología para su extracción y cuantificación en el suelo del Valle del Mezquital. La metodología

aplicada para lograrlo, así como los resultados obtenidos, son presentados en el capítulo VI de la tesis.

El segundo de los colorantes evaluados, el fluoresceín, al ser un colorante altamente soluble y de fácil cuantificación por técnicas espectrofotométricas, su análisis se enfocó en dos rasgos principales: degradación y dosis a utilizar en el suelo estudiado. De esta forma, en el capítulo VII se presenta la metodología y los resultados obtenidos en el estudio de la degradación del colorante en solución y mezclado con el suelo; así mismo la metodología empleada para la obtención de columnas de suelo intactas en el campo, secundado por la determinación de la concentración y lámina de solución de colorante aplicada en las columnas.

El capítulo VIII presenta las conclusiones generales y recomendaciones sugeridas para la continuidad del proyecto de investigación.

II MARCO TEÓRICO

II.1 El suelo

Existen diversas formas de definir el suelo, aquí se presentan tres definiciones que se relacionan con el tema de la tesis:

Desde el punto de vista **hidrodinámico**, el suelo es un medio poroso compuesto de tres fases: sólida, líquida y gaseosa. La proporción de estas diferentes fases varía de acuerdo al tipo de suelo, pero también en el curso del tiempo según los episodios climáticos.

Hidrológicamente, el suelo es un importante **almacenador de agua**, lluvias intermitentes son transformadas en flujos de agua continuos para las raíces de las plantas. Junto con el agua subterránea, el suelo transforma precipitaciones discontinuas en descargas continuas que constituyen las corrientes y los ríos.

La definición **Ambiental** de los suelos, señala que estos son atenuadores naturales de contaminantes, constituyen **filtros naturales** que garantizan la calidad del agua de acuíferos.

Es también familiar principalmente para las personas que viven en el campo, y mucho más para los agricultores, que si se tiene a mano una porción grande de suelo (un terrón), y se aplica suficiente agua en uno de sus extremos, parte de esta agua atravesará dicho suelo y escurrirá por su extremo inferior. El resto del agua quedará absorbido dentro de esta porción del suelo. Este conocimiento es el que permite decir que el suelo contiene poros vacíos o más bien ocupados por aire, y que ese aire fue desplazado al introducir agua. Esto también permite decir que esos espacios dentro del suelo están *interconectados* formando un ambiente continuo con una serie de “canales” a través de los cuales el agua fluye hasta salir del terrón. Ello permite categorizar al suelo como un “*medio poroso*” (Raymundo, 2008).

II.2 Conductividad hidráulica, K

La conductividad hidráulica K , se define como una medida de la capacidad del suelo de transmitir agua cuando está presente un gradiente hidráulico. Más específicamente, la conductividad hidráulica determina la capacidad del fluido en el suelo a fluir a través de la matriz del suelo bajo un gradiente hidráulico determinado (Amoozegar and Wilson, 1999).

Los valores de K no son constantes para un mismo suelo, sino que varían espacial y temporalmente debido a alguna de las siguientes razones: la estructura del suelo que involucra la geometría de la red porosa lo cual conduce a la heterogeneidad del medio poroso y a la anisotropía, interacciones entre el medio poroso y el líquido (expansión de las arcillas, deterioro debido al riego con aguas salinas, etc.), cierre de los poros por aire entrampado, y en muchos casos es fácilmente alterado por las actividades de manejo del suelo como la labranza, la aplicación de materia orgánica o la compactación por el paso del arado (Díaz *et al.*, 2003).

II.3 Porosidad del suelo

La porosidad (η) o la porosidad volumétrica, propiedad de un medio poroso macroscópico, se define como la relación del volumen de espacio vacío (V_v) al volumen total (V_t) del suelo (Bear, 1972).

$$\eta = \frac{V_v}{V_t} = \frac{(V_t - V_s)}{V_t}$$

Donde V_s es el volumen de partículas de suelo dentro del V_t . Usualmente la porosidad, una cantidad adimensional, es expresada en porcentaje.

Cuando V_v es el total del espacio vacío, ya sea que los poros estén interconectados o no, la porosidad es denominada *porosidad total o absoluta*. Sin embargo, desde el punto de vista del flujo a través del medio poroso, solamente los poros interconectados son de interés. Por consiguiente, se ha introducido el concepto de *porosidad efectiva* η_e , el cual se define como la relación del volumen de poros interconectados (o efectivos) $(V_v)_e$, al volumen total del medio.

$$\eta_e = \frac{(V_v)_e}{V_t}$$

$$(V_v)_e + (V_v)_{\eta_e} = V_v$$

Donde $(V_v)_{\eta_e}$ es el volumen no efectivo (volumen de poros no interconectados).

II.4 Flujos preferenciales

La conductividad hidráulica junto con la porosidad efectiva, dependen de la geometría, interconexión y la distribución del tamaño de poros dentro del suelo. Su conocimiento y medición es muy importante pues los plaguicidas, y solutos en general, se mueven disueltos o arrastrados con el agua del suelo. La presencia de macroporos interconectados, tienen relación directa con la agregación natural del suelo y pueden constituir rutas preferenciales de flujo dentro del suelo (Crescimanno *et al.*, 2007), mecanismo principal utilizado hoy día para explicar la aparición relativamente rápida de contaminantes en las aguas subterráneas.

El término *flujo preferencial* hace referencia a que el agua que se infiltra no tiene suficiente tiempo para entrar en equilibrio con el agua que permanece en la matriz del suelo moviéndose más lentamente. Estos flujos preferenciales pueden presentarse, por ejemplo, en suelos estructurados, donde los macroporos (grietas, túneles provocados por macroorganismos como lombrices e insectos, los agujeros de las raíces) dominan la hidrología del suelo, particularmente en suelos de textura fina, y operan como rutas de alta conductividad de flujo atravesando la matriz más densa y menos permeable del suelo. Estos flujos preferenciales pueden darse también en suelos arenosos no estructurados en forma de frentes inestables de humedecimiento, lo cual es causado por perfiles heterogéneos tales como las interfaces en los horizontes o por repelencia de agua (Jarvis, 1998). Una consecuencia de los flujos preferenciales es un frente heterogéneo de penetración de los solutos en el suelo, en comparación de lo que predice la ecuación de convección-dispersión (simple), lo cual modeliza un frente homogéneo de infiltración.

II.5 El uso de trazadores del agua en los experimentos de transporte de solutos

Conocer con precisión el movimiento del agua en el suelo en los experimentos de transporte es básico en este tipo de estudios pues es con respecto al movimiento del agua que se describe el movimiento del soluto. Una manera directa de seguir el movimiento del agua es añadirle una sustancia miscible que pueda identificarse y medirse con facilidad, y que sea inerte. Esta sustancia es la que se conoce con el nombre de trazador.

Las características que debe cumplir el trazador del agua son las siguientes (Custodio, 1975):

- Viajar a la misma velocidad del agua.
- Que no se separe del agua, no se precipite ni sufra retención por filtración mecánica.
- No interaccione con el suelo, no sea absorbido, ni sufra procesos de intercambio iónico o isotópico.
- Que sea estable, químicamente y biológicamente en el agua en el que sea utilizada, es decir que no se oxide, no se reduzca y no se degrade.
- Que al agregarse al agua, esta no sufra alteración física, o química de sus propiedades.

- Que no altere las propiedades del terreno, permeabilidad, ni porosidad.
- Que baste con utilizar pequeñas cantidades y aun así sea fácil su detección en forma cuantitativa.
- Que sea de fácil manejo.
- Que no sea tóxico.
- Que sea relativamente barato y fácil de obtener.
- Que no exista en el agua y que el suelo no lo aporte naturalmente.

Los trazadores del agua pueden ser de dos tipos: aniónicos o isotópicos. Los trazadores aniónicos principales son el Cl^- y el Br^- por su carácter conservativo y escasa presencia natural en los suelos. Tienen la desventaja de su reactividad en suelos con alto contenido de arcillas donde la carga electroquímica negativa de las arcillas induce exclusión aniónica, lo cual provoca una rápida salida de estos trazadores. Del mismo modo, presentan reactividad en suelos con arcillas de carga variable, pues las superficies de este tipo de arcillas, dependiendo del pH del suelo, tienen la particularidad de retener cationes o aniones provocando retardo en la salida del trazador.

Los trazadores isotópicos del agua consisten en que alguno de los elementos que compone la molécula de agua (Hidrógeno u Oxígeno) es un isótopo con escasa presencia natural en el conjunto de moléculas del agua. En ello consiste su ventaja de trazador pues el agua utilizada en el experimento es enriquecida con moléculas de agua que contienen este tipo de isótopo. Los isótopos de los elementos que componen el agua son de dos tipos: radioactivos o estables. En el caso del Hidrógeno los trazadores radioactivos más usados son tritio o deuterio, y tienen la desventaja de que las metodologías de trabajo con estos isótopos son relativamente complicadas y requiere condiciones especiales para su uso debido al problema de seguridad sanitaria para las personas (Sparks, 1995). En el caso del Oxígeno, el isótopo más común en las investigaciones de transporte es el oxígeno 18 (H_2^{18}O).

II.6 El riego con aguas residuales crudas.

El uso del agua residual para riego de zonas agrícolas es una práctica ampliamente utilizada en el mundo. Sobre todo en países en vías de desarrollo el reúso de aguas residuales en el riego agrícola es una opción para optimizar el uso del agua, reciclar nutrientes y reducir los costos del tratamiento. En la actualidad se riegan más de 300 000 ha con aguas residuales en el mundo. Las extensiones más amplias bajo este esquema se encuentran en el Valle del Mezquital en México, en Vietnam, en Chile, en China, en la India y en Colombia (Raschid-Sally y Jayakody, 2008). En nuestro país esta práctica responde al problema de disposición de estas aguas cuando no se cuenta con la infraestructura para su tratamiento y reúso industrial o para servicios; y al requerimiento del recurso en zonas donde la precipitación pluvial no es suficiente para la producción agrícola (Jiménez-Cisneros, 1995; Siebe, 1998). Esta práctica ha permitido incrementar la producción agrícola altamente benéfica para cubrir las necesidades alimentarias en el país, y por otro, los efectos adversos en la contaminación del suelo y del acuífero por la carga de contaminantes que son vertidos junto con el agua residual.

II.6.1 Transporte rápido de agua y solutos en el suelo: flujo preferencial

Se ha demostrado en varios experimentos de campo, que los solutos reactivos se comportan de manera completamente diferente a las predicciones basadas en la teoría convencional de flujo de masa (ecuación convección-dispersión), lo cual se debe a los flujos heterogéneos o flujos preferenciales. De acuerdo con Andrews (2004) el flujo preferencial y los procesos de transporte forman parte de los indicadores utilizados para monitorear la integridad de las funciones del suelo, denominados estabilidad de macroagregados y densidad aparente. Prado (2006) pone en evidencia que el flujo preferencial ocurre incluso en suelos permeables y finamente estructurados

como los Andosoles de México. El interés de estudiar el proceso se debe a que el flujo preferencial reduce la capacidad buffer del suelo, con las consecuencias evidentes en la calidad del agua (Jarvis, 2007).

El hecho de que el flujo de agua en el suelo no sea uniforme resulta un desafío para los físicos de suelo, la cuantificación y predicción del flujo preferencial en el transporte de contaminantes y sus consecuencias, ha sido difícil de analizar debido a la compleja estructura del suelo (Perret *et al.*, 2000). En efecto, el conocimiento de la estructura del suelo, junto con una técnica adecuada para medir las características del flujo de agua y solutos a través del suelo, son esenciales para entender los mecanismos del flujo preferencial.

III DESCRIPCIÓN DE LA ZONA ESTUDIO

III.1 El Valle Del Mezquital.

III.1.1 Localización

El Valle del Mezquital se localiza al suroeste del estado de Hidalgo, a una altitud media de 1 895 msnm; está limitado al norte por el Valle de Ixmiquilpan, al este por el Valle y la Sierra de Actopan, al oeste por la Sierra de Ximthe y al sur por el Estado de México (Figura III.1), IPC, 2009.

El Valle del Mezquital forma parte de la zona árida Queretano-Hidalguesa, es una cuenca de origen lacustre que ocupa las depresiones que se han formado entre el relieve montañoso de la llamada meseta central.

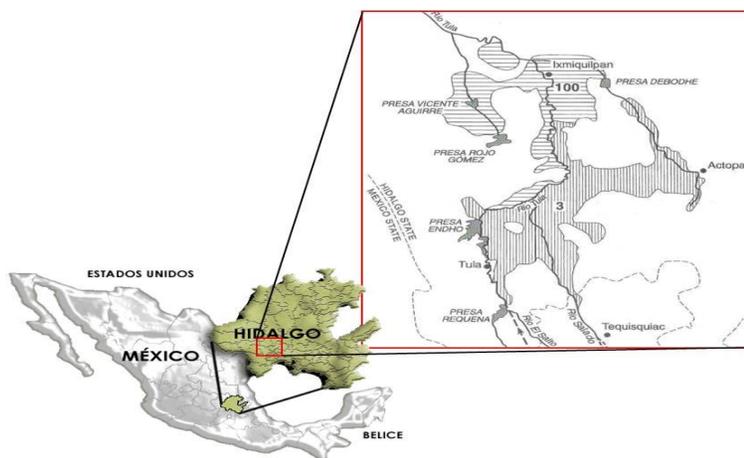


Figura III.1. Plano de localización del Valle del Mezquital.

Los montes que rodean al Mezquital son macizos con alturas entre los 2,500 y 3,000 msnm. Esta zona comprende 28 municipios, entre los más importantes se encuentran Actopan, Alfajayucan, El Cardonal, Chilcuautla, Ixmiquilpan, Nicolás Flores, San Salvador, Santiago de Anaya, Tasquillo y Zimapán (González-Quintero, 1968).

III.1.2 Rasgos físicos

III.1.2.1 Tipo climático

El clima es templado seco con lluvias en verano (BS) con sus variantes BS₁ y BS₀, (Bravo, 1978) y contrasta con el clima más húmedo que gozan las cimas, situación que se refleja en la vegetación, señalando una variación climática altitudinal y otra de carácter topográfico. El clima del Valle del Mezquital está determinado principalmente por el patrón general de circulación atmosférica que caracteriza esa latitud, el cual es acentuado por la orografía, causa de una

marcada sombra de pluvial (Contreras Arias, 1955) y por otro lado la altitud es el determinante primordial de la temperatura.

III.1.2.2 Temperatura

El promedio anual de temperatura muestra variaciones de año a año, especialmente en la planicie, en Ixmiquilpan durante el lapso 1940 a 1960 han variado de 16.1° a 19.1° C, la temperatura media anual es de 18.3° C. este factor en la misma estación oscila mensualmente de 16° C (diciembre) a 22.9 o C (Junio) y las temperaturas extremas desde -9° C (enero; 1956) hasta 39° C (mayo).

III.1.2.3 Precipitación

La precipitación es de los elementos climáticos, el que reviste la mayor importancia en la ecología vegetal de las zonas áridas, ya que en esta condición el agua es el factor limitante.

Existen dos máximos de precipitación uno en junio y otro en septiembre. El primero se debe a los vientos alisios, masas de aire que provienen del noreste, mientras que el segundo esta en conexión con fenómenos ciclónicos originados en el Caribe o en el Golfo de México que desplazan masas de aire hacia el noreste.

La máxima precipitación ocurre durante el lapso mayo-septiembre y los más bajos son en febrero y marzo. Los datos estudiados registrados en Ixmiquilpan de 1940 a 1960 muestran que la precipitación anual oscila entre 217.6 mm en el año más seco y de 773.3 mm en el año de mayor pluviosidad. La precipitación media anual es de 410.7 mm (González-Quintero, 1968).

III.1.3 Hidrología

En el Valle del Mezquital se encuentra el Distrito de Riego No. 03, Tula, integrado por 14 municipios, con una superficie total de 52 270 hectáreas, y una superficie total regable de 34 970 hectáreas, Cuadro III.1, (IPC, 2009).

Cuadro III.1: Superficie regable por municipio

Municipio	Superficie (Hectáreas)
Atitalaquia	2 298.31
Atotonilco de Tula	258.56
El Arenal	44.10
Chilcuautla	61.80
Ixmiquilpan	315.59
Mixquiahuala	8 032.17
Progreso	2 218.40
Tecatepec	4 997.28
Tepetitlán	1 013.50
Tetepango	666.47
Tezontepec	6 238.36
Tlahuelilpan	1 090.51
Tlaxcoapan	2 599.66
Tula	5 135.47

III.1.3.1 Láminas de riego

Debido a la elevada salinidad del suelo del Valle del Mezquital así como el aporte a los terrenos agrícolas de materia orgánica, nitrógeno y fósforo, los agricultores emplean elevadas láminas de riego (superiores a 1 m), lo que ha originado una recarga artificial del acuífero en una cantidad que se estima del orden de 25 m³/s, ver cuadro III.2, (IPC, 2009).

Cuadro III.2. Lámina de riego en los distritos de riego 03 y 100.

Concepto	Distrito de riego 03 Tula	Distrito de Riego 100 Alfajayucan
No. De usuarios	30 948	249
Superficie regada (ha)	43.564	21 103
Volumen Distribuido (miles de m ³ /año)	911 501.4	408 708
Lámina bruta (cm)	209.2	65.9

III.1.4 Geología

Segerstrom (1962) realizó una descripción de esta zona, abarcando desde el Jurásico hasta el Plioceno. En esta área la formación Tarango, constituida por depósitos clásicos continentales del Plioceno-Pleistoceno ocupa el fondo del valle, extendiéndose parcialmente sobre las faldas de algunas colinas, es decir esta formación abarca la mayor parte del Valle de menor importancia son la formación el Doctor, de caliza marina casi pura del cretácico y el grupo Pachuca, conjunto de rocas volcánicas del Mioceno que varían del basalto a la riolita. Ocupando una porción limitada del 15% de la superficie. La primera formando varios macizos en la parte central de la región mientras que la segunda constituye las elevaciones montañosas de la Sierra de Xinthé, Juárez y Actopan. Otras formaciones son las de Mazcala, Méndez, Soyatal y las Trancas construidas por rocas calcáreas y el grupo San Juan formado por riolitas y andesitas (González-Quintero, 1968).

III.1.5 Geomorfología

III.1.5.1 Relieve

El Valle del Mezquital presenta una superficie de forma trapezoidal de 56 km de altura y 47 km en su base mayor, queda comprendida entre los 20° 11' de latitud norte y los 98° 50' y 99° 20' de longitud este. Forma parte de la provincia fisiográfica denominada Meseta Neovolcánica (Raisz, 1959), en su porción cercana a la vertiente occidental de la Sierra Madre Oriental. La máxima elevación, se encuentra en la Sierra Juárez y corresponde al cerro Boludo, de 3100 m, destacando el cerro de Juárez de 3000 m, la muñeca y San Juan de 2800 m ambos. La Sierra de Xinthé presenta una altura media de 2500 m. Para la parte sur encontramos elevaciones medias de 2800 m, destacando las elevaciones de Ulapa, Mexe, Chinfí y la Cantera, las menores elevaciones corresponden a la Sierra de Actopan con 2400 m, favoreciendo la entrada de masas atmosféricas con humedad proveniente del Oriente. En la parte central se eleva la Serranía de San Miguel de la Cal hasta alcanzar una altura de 2800 m, con trayectoria suroeste-noreste dividiendo al Valle en tres zonas, propiciando desniveles en las planicies que separa. La planicie norte, situada entre los 1700 y 1850 msnm, ligeramente ondulada y con un declive suave hacia el oeste. Se considera como el Valle de Ixmiquilpan, ya que corresponde a la totalidad el municipio de ese nombre.

La planicie noreste, hacia el oriente el Cerro Santa María que corresponde en dirección norte-sur. Esta planicie se encuentra a una altitud de 1900 m sobre una superficie llana. Siendo una franja angosta cuyo extremo norte pertenece al municipio el Cardinal y el resto a parte de Ixmiquilpan. La planicie sur está localizada entre 1950 m de altitud de superficie moderada con declive norte. Se le conoce como Valle de Actopan, abarcando la totalidad del municipio de San Salvador y solo parte del municipio de Actopan, Chilcuautla, Mixquiahuala, Tepatepec y Santiago (González-Quintero, 1968).

III.1.5.2 Suelos

Los suelos del fondo del Valle son profundos, casi sin roca superficiales pobres en materia orgánica y deficientes en varios elementos, cuya textura más común es el migajón arenoso y el migajón arcilloso (Mayagoitia, 1959).

Los tipos de suelo de las localidades bajo estudio corresponden a Castañozem, Cálculo/ clase textural media (Kk/2) en los municipios de Ixmiquilpan y el Cardonal localidad Bingu, así como a un Regosol, Eútrico/ clase textural media (Re/2) en el municipio de Santiago de Anaya, localidad González-González y El Rincón I y II municipio El Arenal (Actopan) a un Feozem, Háplico/clase textural fina (Hh/3) (INEGI, 1981; Carta edáfica Pachuca F14D81).

El pH de los suelos es de alrededor de 8 esto se debe al depósito de materiales producto de la erosión que sufre la caliza que existe en la zona. Los suelos son más delgados en la cercanía de las zonas montañosas y en algunos casos llegan a emerger el horizonte B del suelo (Caliche).

Las laderas tienen suelos inmaduros y en la mayoría de los casos estos son muy someros, salvo en los lugares donde la tipografía entre otros factores, permite su desarrollo. Así se encuentran los que se han originado sobre rocas ígneas, que son suelos arenosos de color pardo y los que provienen de calizas, son de color oscuro, más ricos en materia orgánica (González-Quintero, 1968).

III.1.6 Vegetación

Tipos de vegetación

- a) Matorral desértico aluvial
 - Matorral de *Prosopis*
 - Matorral de *Flourensia*
- b) Matorral Crasicaule
- c) Matorral de *Fouqueria*
- d) Matorral desértico Calcicola
- e) Matorral de *Juniperus*
- f) Matorral de *Quercus*
 - sobre sustrato riolítico
 - sobre sustrato calizo
- g) Encinares
- h) Pastizal
- i) Vegetación de galería
- j) Vegetación Ruderal.

Dentro del Valle del Mezquital el tipo de vegetación implantado que se tiene agricultura de temporal y pastizal inducido (INEGI, 1981).

III.2 Rancho Las Palmas

Se ha seleccionado un sitio con 80 años de riego con agua residual, con suelos de tipo Phaeozem. El acceso a la zona es a través de la carretera federal No. 85 (México-Laredo), que une a los poblados Arenal, Actopan, Caxuxi, Lagunilla, Patria Nueva, Yolotepec e Ixmiquilpan. La carretera México-Querétaro, por su salida a C.F.E.-Tula, conduce a Tula, Tlahuelilpan, Mixquiahuala, Progreso, uniéndose a la anterior en Ixmiquilpan, (IPC, 2009).

El sitio de estudio es una parcela tecnificada ya que la tierra es arada, sembrada y se cosecha mediante maquinaria especializada.

La parcela en estudio se encuentra en un pie de monte extendido; Cuenta con una entrada y una salida de agua durante el riego. Las dimensiones de la parcela son 180 x 135 m, lo cual representa un área de 2.43 hectáreas (24,300 m²).

En este sitio se cultiva alfalfa, pasto forrajero y maíz, cada cultivo tiene un periodo de desarrollo de tres meses y entre cada cultivo se da un mes para preparar la tierra.

Se aplican una gran variedad de fertilizantes y plaguicidas comerciales para elevar la productividad, la aplicación de éstos se da antes y durante la cosecha, las plagas más comunes: los pulgones, gusanos barrenados, arañas, mosca blanca y hongos, entre otros.

El sistema de riego tradicional es el de gravedad por inundación; La parcela se riega con agua residual, la cual se aplica mediante inundación por un periodo que puede durar de 4 a 6 horas con una lámina de aproximadamente 20 cm.

El intervalo mínimo de cosecha desde la última aplicación de agua residual es de 20 días para riego por inundación y de 15 días para riego por canales.

IV PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El Valle del Mezquital se localiza al suroeste del Estado de Hidalgo y se caracteriza por el uso en la agricultura de aguas residuales crudas provenientes de la Ciudad de México y su zona conurbada, desde 1886 (Jiménez y Landa, 1998). La práctica de riego de zonas agrícolas con aguas residuales se lleva a cabo en varios lugares del mundo (Raschid-Sally y Jayakody, 2008), sin embargo, la zona del Valle del Mezquital es la más antigua, además de la más extensa a nivel mundial. Bajo este esquema, el Valle del Mezquital constituye un sitio de estudio adecuado para evaluar el efecto que la utilización de aguas residuales tiene en el ambiente, principalmente en la calidad del suelo y el riesgo de contaminación del acuífero por diferentes solutos.

Un volumen de aproximadamente 45 m³/s de agua residual cruda es regado en una superficie de 99,536 hectáreas de tierras agrícolas, transformando una zona semi-árida en un sitio de alta producción agrícola, e incrementando el caudal del río Tula de 1.6 a 12.7 m³/s en los últimos 50 años (CONAGUA, 2007). El incremento en la recarga ha creado una nueva fuente de abastecimiento de agua potable que en efecto constituye la principal fuente de agua para los 500 mil habitantes y los usos industriales en la zona del valle.

Al ser cruda, el agua de riego constituye una fuente importante de nutrientes, patógenos, metales pesados, sólidos orgánicos e inorgánicos, disueltos y suspendidos. Por tal motivo, el sitio ha sido sujeto a diversas investigaciones referentes al efecto de la aplicación del agua residual sobre: el agua subterránea (BGS y CNA, 1995); la fertilidad del suelo y la acumulación de metales pesados (Gutiérrez *et al.*, 1996, Siebe y Fischer, 1996); la acumulación de metales y enfermedades gastrointestinales (Siebe y Cifuentes, 1995); las entradas de nutrientes a través del agua residual y su efecto sobre la producción agrícola (Siebe, 1998). Sin embargo, existen pocos trabajos en los que se describa el proceso físico del transporte de solutos disueltos, o trabajos que refieran cómo las características físicas y químicas del suelo influyen en el destino de los diferentes solutos; algunos trabajos implican mecanismo o reactivos que resultan poco accesibles y hacen difícilmente viable el correcto desarrollo de la investigación.

El proyecto de tesis plantea seleccionar un colorante que sirva para ser utilizado como trazador de la trayectoria del agua y los solutos disueltos que la usan como vector, en suelos del Valle del Mezquital.

Se han realizado diversos trabajos de investigación sobre rutas de flujo preferencial en suelo, algunas de estas son desarrolladas con colorantes fluorescentes como la piranina aplicado en suelos Andosoles cuya investigación fue desarrollada por Duwig y colaboradores (2008), su efectividad como trazador de rutas de flujo preferencial a quedado evidente, sin embargo se desconoce su comportamiento en suelos de tipo Phaeozem, presente en el rancho Las Palmas, en esta tesis se pretendió desarrollar y aportar un procedimiento para conocer la sorción del colorante y su posterior cuantificación.

Después de una búsqueda bibliográfica no se logro obtener información sobre alguna investigación donde se haya empleado el colorante fluorescein como trazador de rutas de flujo preferencial, por lo cual la importancia de su aplicación en esta tesis radica en evaluar la conducta del colorante en una mezcla con suelo y en solución acuosa, posteriormente y en base a los resultados, obtener un protocolo de uso del colorante fluorescein como trazador considerando su utilidad en trabajos futuros donde implique conocer las rutas de flujo preferencial de agua en columnas de suelo intactas.

V OBJETIVOS E HIPÓTESIS

V.1 Objetivo general

Seleccionar un colorante que pueda ser utilizado como trazador de las rutas de flujo preferencial de agua y solutos: determinación de los parámetros de sorción y degradación del colorante en el suelo.

V.1.1 Objetivos particulares

- Proponer la metodología para evaluar la sorción del colorante pyranine (*8-hydroxypyrene-1,3,6-trisulfonic acid trisodium*) en el suelo.
- Evaluar el tiempo de viabilidad del colorante fluorescein (*Fluorescein sodium salt*), en agua y en suelo.
- Proponer los parámetros experimentales, concentración de colorante fluorescein y lámina de riego aplicada en columnas de suelo intactas.

V.2 HIPÓTESIS

La utilización de un colorante como trazador del flujo preferencial del suelo, permitirá observar la heterogeneidad de los esquemas de flujo de agua en el suelo, en el tiempo y en el espacio, y que son afectados por las condiciones del medio, en particular por la cantidad de las arcillas expandibles que contiene el suelo y que determinan la expansión-contracción.

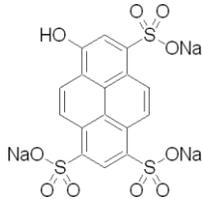
CAPÍTULO VI: COLORANTE PIRANINA

VI.1 METODOLOGÍA PIRANINA

VI.1.1 Características del colorante

Piranine (8-hydroxypyrene-1,3,6-trisulfonic acid trisodium)

Cuadro VI.3. Nomenclatura de la piranina

Formula extendida:	
Sinónimos:	HPTS, Pyranine, Solvent Green 7, Trisodium 8-hydroxypyrene-1,3,6-trisulfonate
Número CAS:	6358-69-6
Formula lineal:	C ₁₆ H ₇ Na ₃ O ₁₀ S ₃
Peso molecular:	524.39
Número EC:	228-783-6
Número MDL:	MFCD00037575
Id sustancia PubChem:	24880114

Cuadro VI.4. Propiedades de la piranina

P m	62-63.5 °C (lit.) (Chemicalbook, 2010)
Absorción UV Rango espectroscopia:	λ_{ex} 460 nm; λ_{em} 510 nm in 0.1 M Tris pH 8.0
Solubilidad:	Soluble en agua: 300 gL ⁻¹ (25 °C) Metanol puro: 0.1 g/mL, (Chemicalbook, 2010)
Apariencia :	Polvo cristalino amarillo a verdoso.
Usos:	Usado para sensor óptico, indicador pH fluorescente para el área fisiológica. Tiene aplicaciones diversas como: Agente colorante en medicamentos y cosméticos. Teñido biológico. Indicador de detección óptica. Color de lámpara o flash de laser (Chemicalland21, 2010b).

VI.1.2. Procedimiento de extracción de la piranina del suelo.

1. Se colocó 3 gramos de suelo base seca, tamizado en una malla de 2 mm (malla # 10), en tubos de ensaye de vidrio.
2. Se añadió solución madre del colorante piranina con una concentración de 100 mgL⁻¹ hasta alcanzar una apariencia húmeda, sin goteo o encharcamiento.
3. Se dejó reposar permitiendo tener un tiempo de contacto y con esto una interacción entre el colorante con el suelo.

4. Una vez terminado el tiempo de contacto, se adicionó una solución extractora formada por una mezcla de agua-acetona, en una proporción 1:4 para los tratamientos 1, 2 y 3, y en balance 1:6 para los tratamientos 4 y 5.
5. Los tubos se resguardaron con papel aluminio y hule espuma, se colocaron en un agitador orbital, por el tiempo determinado para cada tratamiento.
6. Finalizado el tiempo de agitación, se transvaso a tubos de centrifuga de plástico, y se centrifugó a 2500 rpm con un tiempo marcado de, 40 minutos para los cuatro primeros tratamientos y 20 minutos el último tratamiento.
7. el sobrenadante fue recuperado, se amortiguó el pH alrededor de 7 utilizando HCl 0.1 y NaOH 1 mol., finalmente se determinó la absorbancia en el espectrofotómetro.

A partir del procedimiento general se hicieron 5 tratamientos para la optimización del protocolo (extraer la mayor cantidad del colorante del suelo). Las variables evaluadas fueron: relación agua, volumen de solución extractora, longitud de onda para su determinación y tiempo de centrifugación.

En la cuadro VI.5 se muestra un resumen de los diferentes tratamientos evaluados. En negritas se resalta la variable a evaluar en cada tratamiento.

Cuadro VI.5. Resumen de tratamientos evaluados para optimizar el protocolo de extracción de piranina. En negritas se resalta la variable evaluada en cada tratamiento.

Tratamiento	I	II	III	IV	V
Variante	Tiempo de contacto	Volumen de la solución extractora	Filtración, lectura a 3 λ	Relación agua:acetona 1:6 v/v	Tiempo de agitación
Peso de suelo	3 g	3 g	3 g	3 g	3 g
Número de Muestras	4	3	3	3	3
Testigo	0	1	1	1	1
Volumen (ml) de solución madre [100 mgL ⁻¹]	1.2	1.4	1.4	1.4	1.4
Concentración teórica (mgL ⁻¹)	11.2	4.45	4.45	4.45	4.45
Tiempo de contacto (min)	30	33	22	20	25
Tiempo de agitación (horas)	22	22	22	22	4
Tiempo de centrifugado (min)	40	40	40	45	20
Longitud de onda de la lectura (nm)	402	402	370, 402 y 410	370, 402 y 410	370, 402 y 410
Filtración a 22 μm	No	No	SÍ	SÍ	SÍ

VI.2 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS PIRANINA

Se desarrollaron un total de cinco pruebas (tratamientos), los resultados se muestran a continuación, en forma de cuadro y gráfica, para cada uno de los tratamientos.

VI.2.1. Tratamiento 1

Se colocaron 4 muestras de suelo con colorante, se adicionó 10 ml de solución extractora de acuerdo al procedimiento realizado por Duwig, (2008), con una velocidad de centrifugación de 2500 rpm por 40 minutos.

Cuadro VI.6. Resultados del tratamiento 1

Muestra	Absorbancia (nm)	Concentración (mgL ⁻¹)
1	0.658	23.9
2	> 2.721	100.0
3	> 2.571	94.5
4	> 2.720	100.0

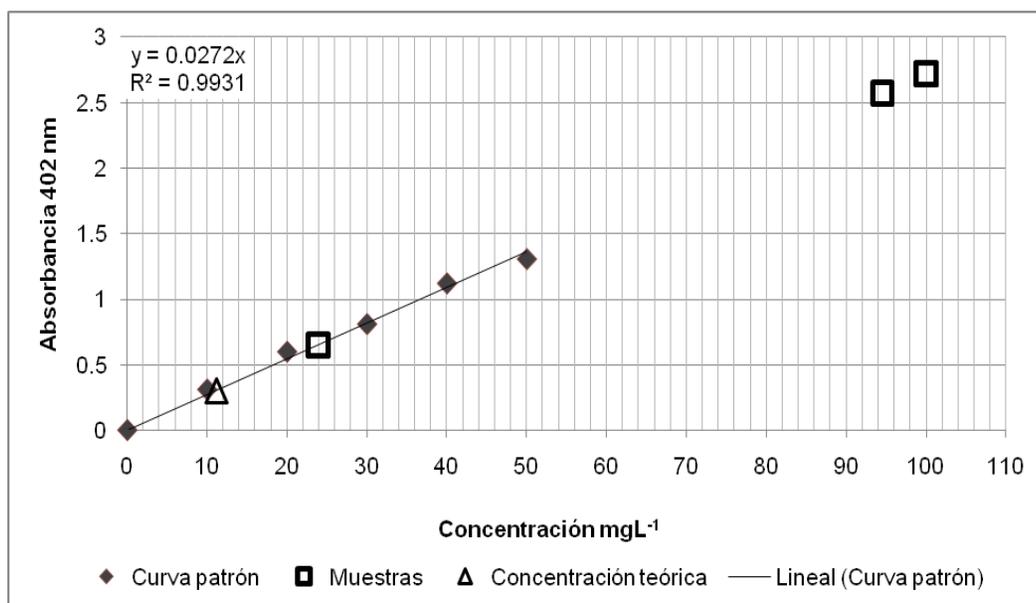


Figura VI.2. Gráfica obtenida en el tratamiento 1, realizada a 402 nm

En la figura VI.2 se muestra el primer tratamiento, donde el valor teórico de la concentración a leer corresponde a 11.2 mgL⁻¹, las muestras se ubicaron por encima de este valor.

El resultado se debe a que las muestras tenían una apariencia muy turbia, probablemente causada por un sobrenadante liberado durante la agitación, por lo cual impide una lectura muy precisa, obteniéndose valores por encima de la curva patrón.

VI.2.2. Tratamiento 2

Por los resultados obtenidos en el tratamiento 1 donde se presenta una turbidez que provoca lecturas de absorbancia muy altas, se sugirió colocar una muestra testigo, sin colorante, esto con la intención de observar que pasaba con el suelo después de sufrir todo el procedimiento.

El volumen de la solución extractora fue aumentada a 30 ml, con el objetivo de permitir una mejor interacción del extractor y el suelo.

Cuadro VI.7. Resultados del tratamiento 2

Muestra	Absorbancia (nm)	Concentración (mgL ⁻¹)
1	1.206	34.1
2	0.496	14.0
3	0.721	20.4
4	0.615	17.4

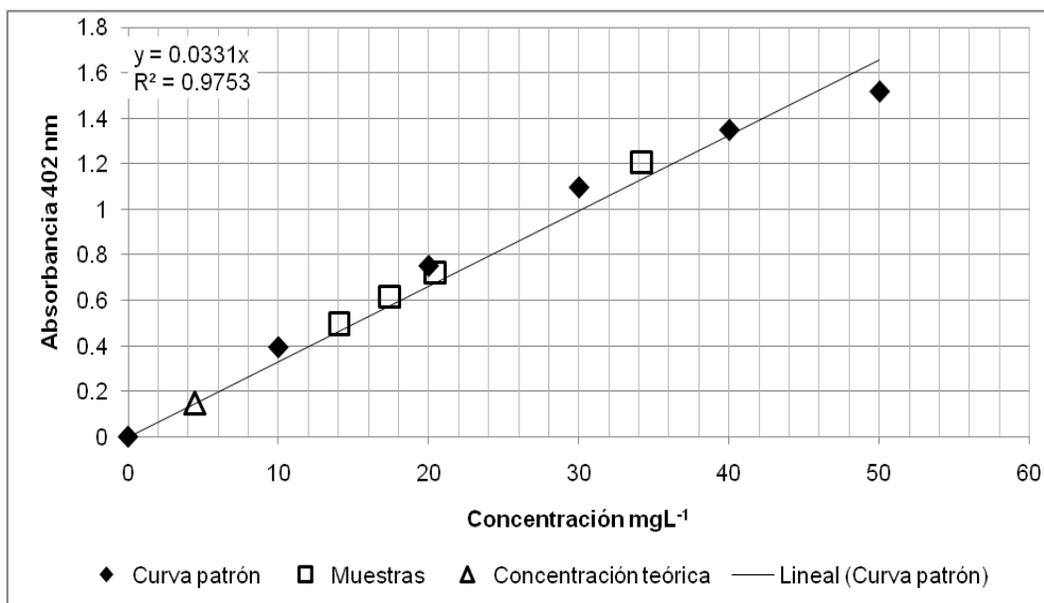


Figura VI.3. Gráfica obtenida en el tratamiento 2, lectura realizada a 402 nm.

El testigo presenta un sobrenadante turbio, producto de la posible liberación de limos, arcillas y / ó materia orgánica causado probablemente por el arrastre de la solución extractora, impidiendo una lectura correcta tal y como lo muestra la figura VI.3.

VI.2.3. Tratamiento 3

Con base en la información técnica del colorante se determinó el uso de tres longitudes de onda para la lectura en el espectrofotómetro (Cuadro VI.8), se hizo con la finalidad de observar el comportamiento de éstas.

Se introdujo el uso de una etapa de filtración con un filtro de membrana cuyo diámetro de apertura fue de 22 μm para poder retener solutos que causan interferencia con las lecturas, esta etapa se practicó tanto a la curva patrón como a las muestras incluyendo al testigo,

Cuadro VI.8. Resultados del tratamiento 3

Muestra	Absorbancia (nm)			Concentración (mgL^{-1})		
	370 nm	402 nm	410 nm	370 nm	402 nm	410 nm
1	1.561	1.127	1.035	94.0	32.8	60.9
2	0.939	0.705	0.623	56.5	20.5	36.6
3	0.782	0.607	0.524	47.1	17.7	30.5
4	0.458	0.374	0.31	27.5	10.9	17.9

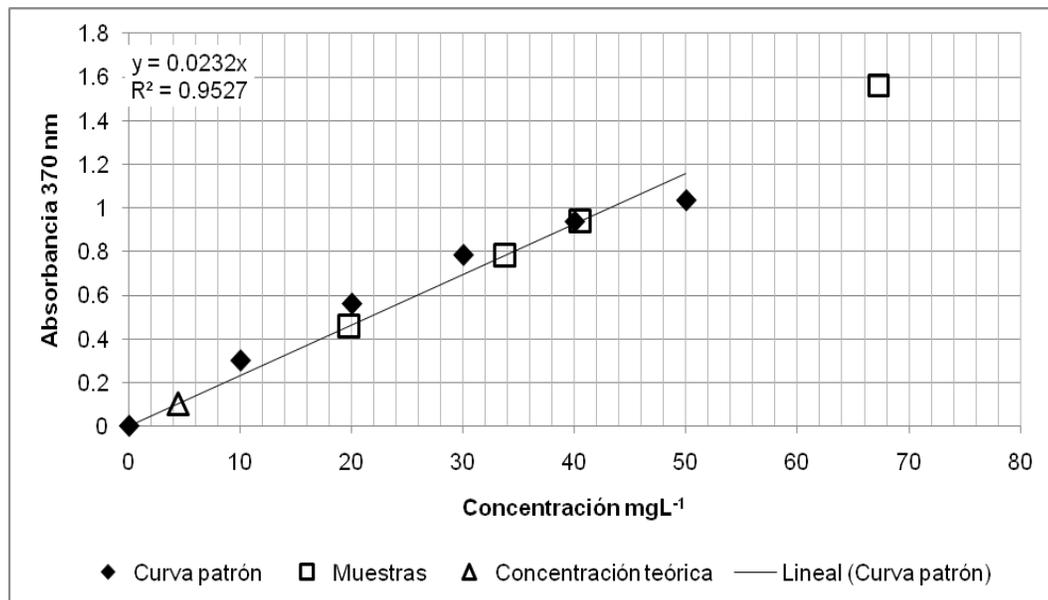


Figura VI.4. Gráfica obtenida en el tratamiento 3, realizada a 370 nm

De acuerdo a los resultados obtenidos, en la figura VI.4 la lectura a 370 nm la curva patrón no es lineal en el rango de concentración usado

Las muestras leídas incluido el testigo dan valores muy altos por encima de la concentración esperada teóricamente, cuyo valor es 4.45 mgL^{-1} (figura VI.4 y cuadro VI.8).

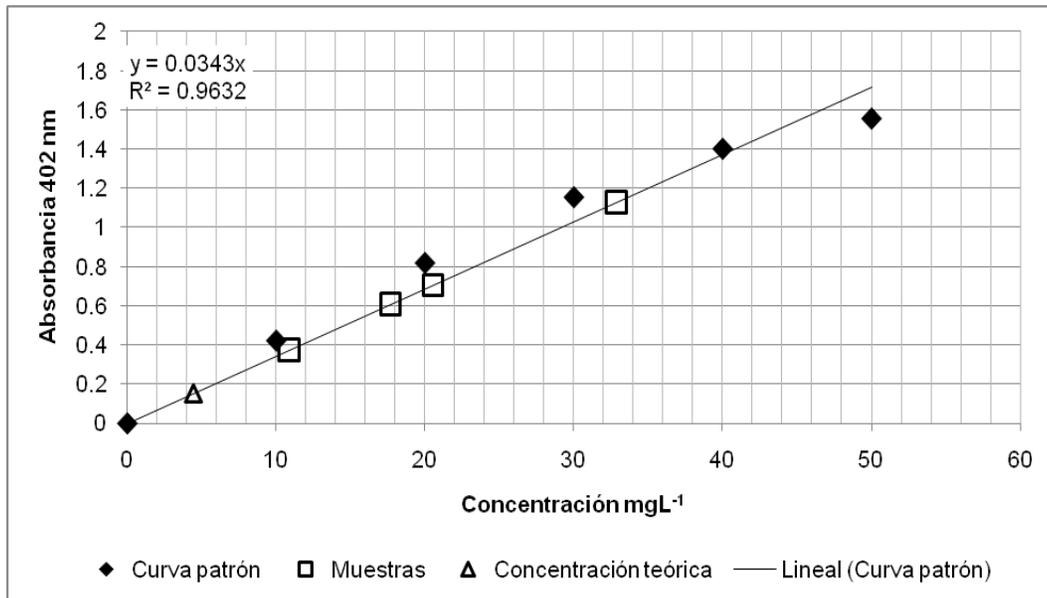


Figura VI.5. Gráfica obtenida en el tratamiento 3, realizada a 402 nm

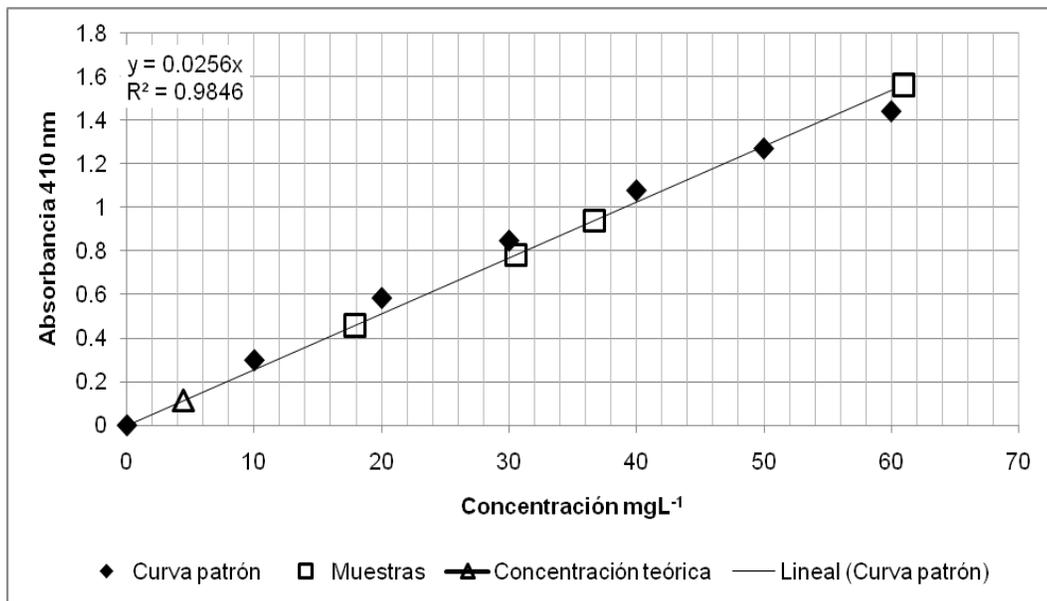


Figura VI.6. Gráfica obtenida en el tratamiento 3, realizada a 410 nm

Tanto en la gráfica obtenida a una onda de longitud de 402 y 410 nm (figura VI.5 y VI.6), los valores son casi uniformes, es decir entran dentro de la curva de calibración, sin embargo siguen siendo altos debido a la gran diferencia con respecto a la concentración esperada, La filtración funcionó, se obtuvieron valores más cercanos al valor teórico, además, todos los valores caen dentro de la curva patrón lo cual indica una precisión más fina. Sin embargo, sigue habiendo una interferencia de sobrenadante, causando una mala lectura en las muestras.

VI.2.4. Tratamiento 4

El resultado derivado del tratamiento anterior revela que un mayor volumen de la solución extractora permite reducir pero no evitar la interferencia provocada por el sobrenadante, por lo cual la variación en este tratamiento fue un ajuste en el balance de la solución extractora, es decir una parte de acetona por seis partes de agua, esto se realizó pensando en la acetona y su característica como disolvente orgánico, al diluirse se reduciría el posible arrastre de materia orgánica al sobrenadante, así se tendría una mejor lectura.

Cuadro VI.9. Resultados del tratamiento 4

Muestra	Absorbancia			Concentración (mgL ⁻¹)		
	370 nm	402 nm	410 nm	370 nm	402 nm	410 nm
1	1.622	1.204	1.09	79.5	39.9	45.4
2	1.828	1.379	1.247	89.6	45.7	51.9
3	0.853	0.656	0.579	41.8	21.7	24.1

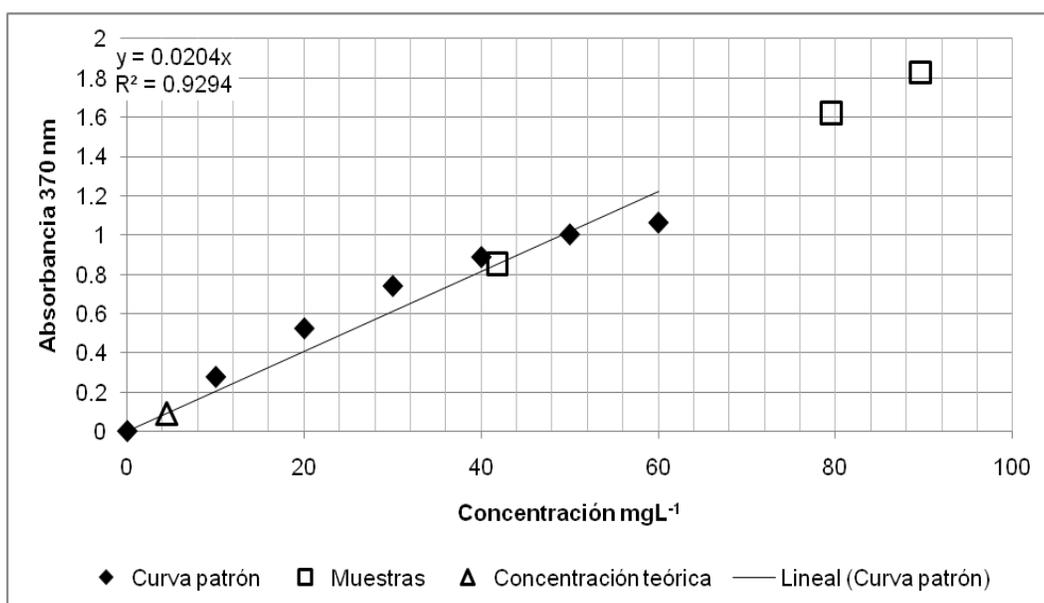


Figura VI.7. Gráfica obtenida en el tratamiento 4, realizada a 370 nm

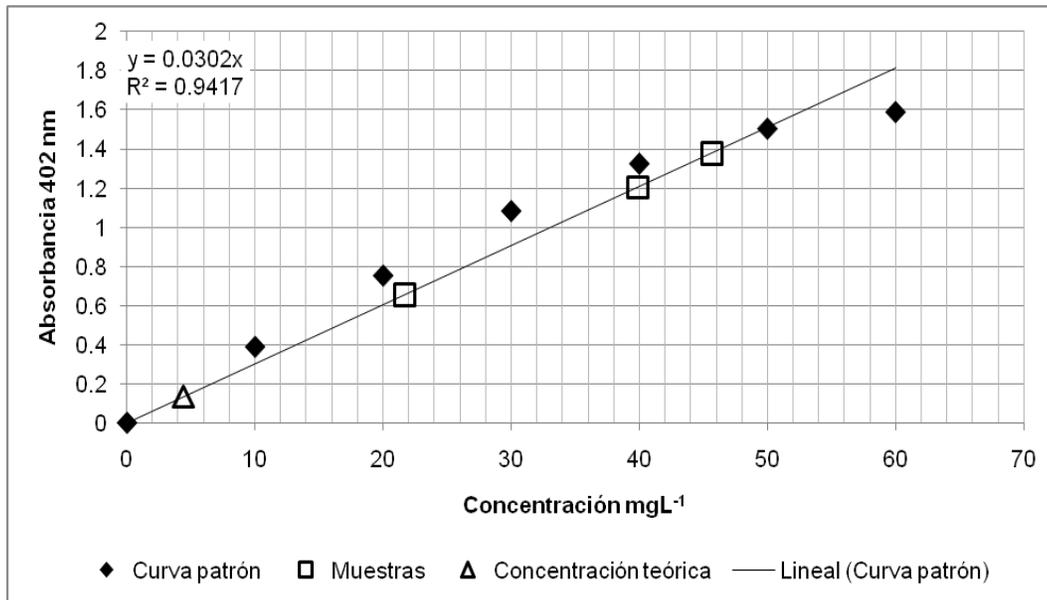


Figura VI.8. Gráfica obtenida en el tratamiento 4, realizada a 402 nm

A 402 nm se da la lectura más cercana a la concentración esperada (figura VI.8), sin embargo todas las lecturas siguen siendo muy altas a 370 y 410 nm (figura VI.7 y VI.9).

La disminución del contenido de acetona de la solución extractora se fundó en que la acetona puede disolver componentes orgánicos como la materia orgánica del suelo, provocando la turbiedad observada en los sobrenadantes obtenidos, no obstante las muestras continuaron presentando una obstrucción causando valores de absorbancia altos y distantes entre las muestras.

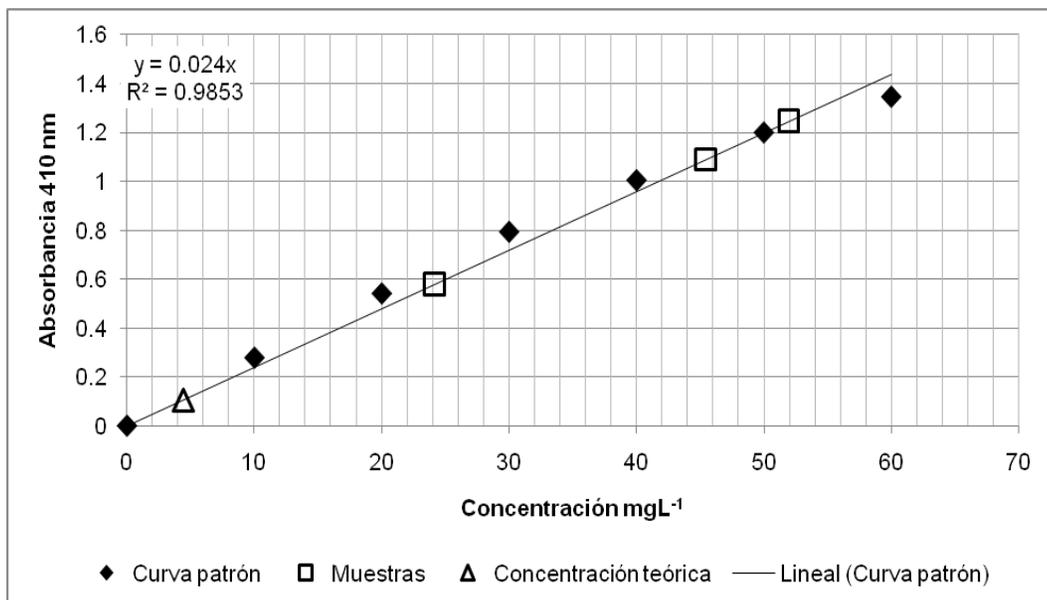


Figura VI.9. Gráfica obtenida en el tratamiento 4, realizada a 410 nm

VI.2.5. Tratamiento 5

El tratamiento 4 fue muy satisfactorio con respecto a las lecturas ya que se disminuyó el error de interferencia, sin embargo no se eliminó, por lo cual se modificó para el tratamiento 5 solo el tiempo de agitación y la velocidad de éste, así la degradación del colorante y la liberación de materia orgánica serían mínimas, permitiendo con esto una lectura más fidedigna.

Cuadro VI.10 Resultados del tratamiento 5

Muestras	Absorbancia			Concentración (mgL ⁻¹)		
	370 nm	402 nm	410 nm	370 nm	402 nm	410 nm
1	0.520	0.434	0.373	20.8	11.7	14.1
2	0.546	0.468	0.402	21.9	12.6	15.2
3	0.570	0.476	0.414	22.8	12.8	15.6

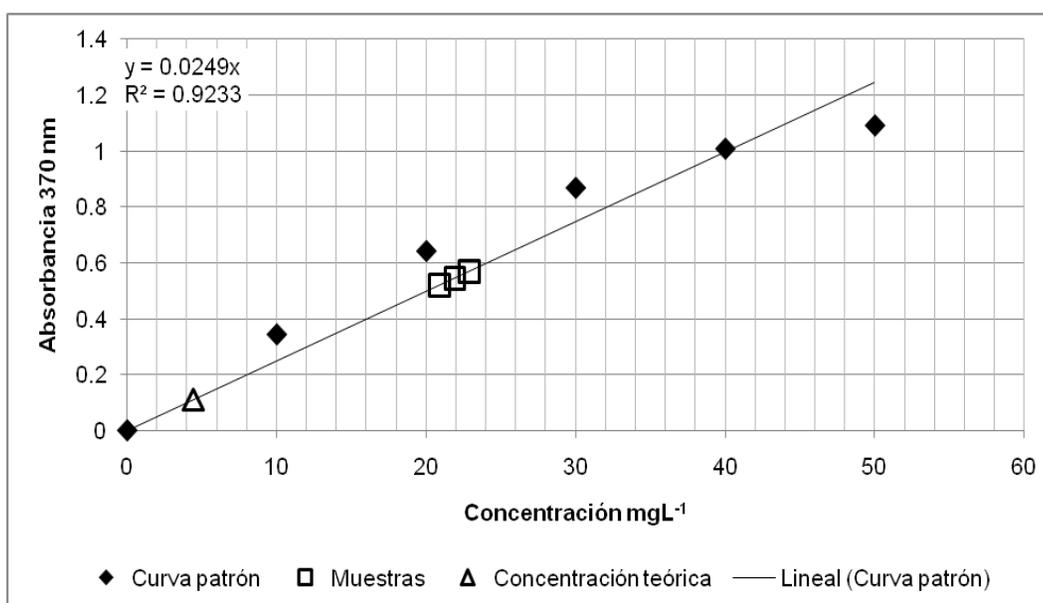


Figura VI.10. Gráfica obtenida en el tratamiento 5, realizada a 370 nm

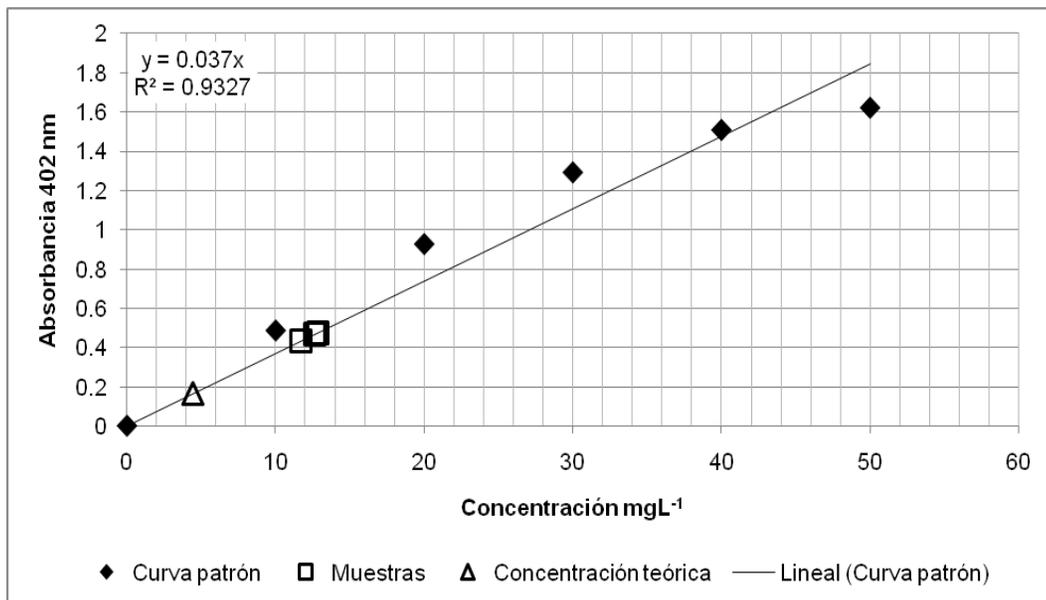


Figura VI.11. Gráfica obtenida en el tratamiento 5, realizada a 402 nm

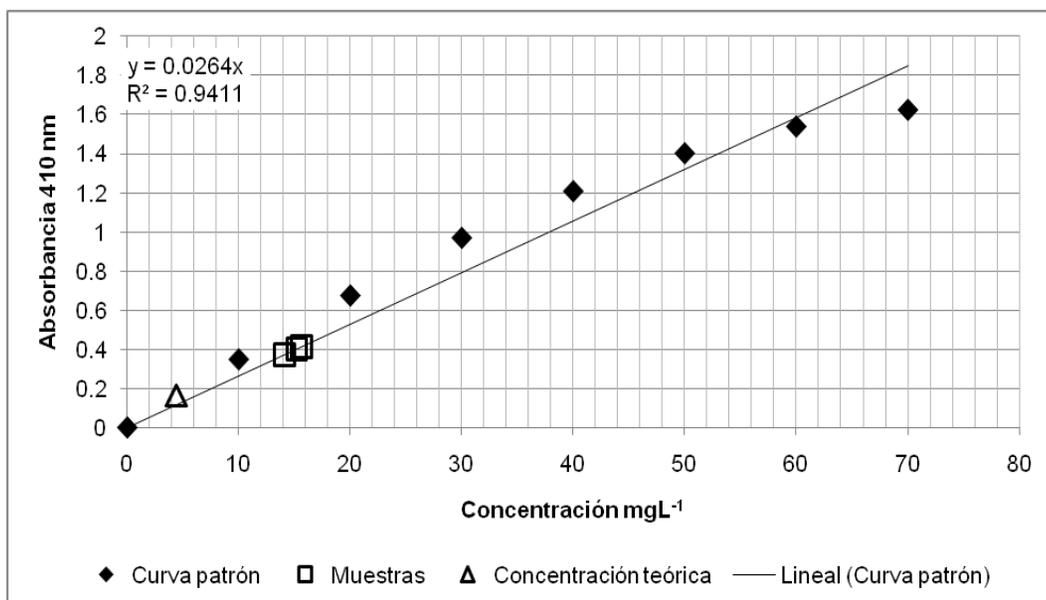


Figura VI.12. Gráfica obtenida en el tratamiento 5, realizada a 410 nm

Se realizó una reducción del tiempo y velocidad del proceso de agitación, la intención fue reducir la exposición del suelo y con ello, la liberación de materia orgánica. El resultado logrado fue satisfactorio ya que se descendieron los valores de lectura de las muestras aproximándose más a la concentración teórica tal y como lo muestran las figuras VI.10, VI.11 y VI.12.

Tanto a 402 (figura VI.11) como a 410 nm (figura VI.12) las lecturas dan como resultado que se acortó la liberación del componente que provocaba la interferencia con esto se dio una lectura más limpia, sin embargo hay trazas que necesitan ser desplazadas con algún medio físico que no interactúe con el colorante.

El análisis de las diferentes variables que determinan la eficiencia en la extracción del colorante piranina del suelo, permiten indicar que de ellas las más significativas a considerar en la extracción

son la relación agua:acetona, la filtración y el tiempo de contacto ya que influyen en la conducta física y química del suelo así como de sus componentes; esta influencia se ve ejercida en la evaluación de la sorción realizada con diferentes tratamientos para el tipo de suelo Phaeozem, evaluaciones donde la constante es una interferencia causada probablemente por un componente del suelo en cuestión.

Se ejecutaron diversos ajustes a los parámetros del procedimiento efectuado por Duwig, (2008) para la cuantificación de piranina, no obstante, no se logró llegar a una propuesta concreta de la metodología, persistiendo hasta el tratamiento 5 un pequeño contaminante en el sobrenadante.

Se planteó continuar con una variación en la cantidad de colorante, es decir, un aumento en el gramaje, por ende la posibilidad de la detección en el sobrenadante final sería más evidente, sin embargo se presentó la limitación del reactivo (colorante), razón por la cual no se desarrolló esta hipótesis.

La información lograda en el trabajo realizado en la sorción del colorante piranina en suelos Phaeozem del Valle del Mezquital, Hidalgo, servirá de base para la continuación del proyecto.

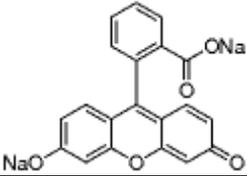
CAPÍTULO VII: COLORANTE FLUORESCEIN

VII.1 METODOLOGÍA FLUORESCEIN (DEGRADACIÓN)

VII.1.1 Descripción Del Colorante:

Sal sodio de fluoresceína (Fluorescein sodium salt)

Cuadro VII.11. Nomenclatura del fluorescein.

Formula extendida:	
Sinónimo:	Amarillo acido 73, uranine
Número CAS:	518-47-8
Formula lineal:	C ₂₀ H ₁₀ Na ₂ O ₅
Peso Molecular:	376.27
Número de índice de color:	45350
Número EC:	208-253-0
Número MDL:	MFCD00167039
Id sustancia PubChem:	24894907

Cuadro VII.12. Propiedades del fluorescein:

P m	283 °C (dec.)(lit.)
Absorción UV	λ_{\max} 406 nm
Rango espectroscopia:	λ_{\max} 630 nm.
Solubilidad:	Soluble en agua y etanol, insoluble en aceites vegetales.
Apariencia :	Polvo o gránulos rojizo-violetas con un lustre metálico, inodoro.
Usos:	Fluorescein es un colorante fluorescente, es usado en la coloración de seda y lana, esta es la razón por la que es llamado también como uranina (uranine), en oceanografía es usado como marcador de agua marina, es colorante en agroquímicos, fertilizantes, detergentes y anticongelantes. En biología es usado como agente de detección para imágenes de estructuras o detalles que no son visibles a simple vista, este es usado como un indicador en el diagnóstico de lesiones traumáticas en corneas y lentes de contacto correctos, es usado en angiografía retinal para detectar derrames sanguíneos por el estudio de reacciones antígeno-anticuerpo. (Chemicalland21, 2010a).

VII.1.2 Evaluación De La Degradación En Agua Y En Suelo

Los objetivos de este capítulo fueron:

- Evaluar concentración requerida de colorante para ponerlo en evidencia en un suelo oscuro.
- Evaluar la tasa de degradación del colorante en el suelo y en agua.

Preparación de soluciones del colorante fluorescein

Se prepararon soluciones del colorante con las siguientes concentraciones: 1, 5 y 10 gL⁻¹.

El procedimiento fue el siguiente.

- Solución de concentración 10 gL^{-1} . se peso 1 gramo del colorante y se aforo a 100 ml con agua destilada. Se repitió el procedimiento para obtener un volumen total de 200 ml.
- Solución 5 gL^{-1} . se tomo 50 ml de la solución de concentración 10 gL^{-1} y se aforo el volumen de solución a 100 ml con agua destilada.
- Solución 1 gL^{-1} . se tomo 10 ml de la solución de concentración 10 gL^{-1} y se aforo el volumen de solución a 100 ml con agua destilada.

VII.1.2.1. Evaluación de la degradación del colorante en el suelo

Preparación de la mezcla suelo con colorante.

En cajas de Petri se pesaron 10 gramos de suelo húmedo y tamizado. Se utilizó suelo del Rancho Las Palmas, ubicado en el poblado de Tlahuelilpan, Estado de Hidalgo.

Se agregó un promedio de 2.7 ml de solución de colorante hasta formar una pasta, se realizó por duplicado para cada una de las siguientes concentraciones: 1 gL^{-1} , 5 gL^{-1} y 10 gL^{-1} .

Se mezcló perfectamente hasta lograr una mezcla homogénea.

Se observó la mezcla bajo la luz negra en cada concentración y se compararon en cada concentración.

De las seis cajas Petri, tres cajas de Petri, una de cada concentración, fueron almacenadas en el cuarto de temperatura constante, a una temperatura de $20 \text{ }^\circ\text{C}$ y protegidas de la luz. Las tres cajas restantes (una de cada concentración), fueron guardadas en el cuarto frío protegidas de la luz.

Cada 24 horas las cajas eran observadas bajo la luz negra y se realizaba la evaluación correspondiente.

VII.1.2.2. Evaluación de la degradación del colorante en solución

- Se prepararon soluciones del colorante fluorescein a las concentraciones de 1, 5 y 10 gL^{-1} .
- Se colocaron en frascos de vidrio con tapadera de rosca, se realizó por duplicado.
- Tres frascos, uno de cada concentración, se almacenaron en el cuarto frío ($T < 5 \text{ }^\circ\text{C}$) protegidos de la luz. Los restantes permanecieron en el cuarto de temperatura constante a $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Se evaluó la intensidad de la coloración bajo luz negra, cada 24 horas durante 6 días.

VII.2. Análisis Y Discusión De Los Resultados Fluorescein (Degradación)

Se evaluó la degradación durante 6 días iniciando el jueves 26 de agosto y se finalizó el 31 de agosto, Se desarrolló una matriz de seguimiento para la evaluación de la degradación del colorante tanto en la mezcla con suelo (cuadro VII.13), como en solución (cuadro VII.14).

Cuadro VII.13. Matriz de seguimiento en mezcla colorante-suelo.

	Mezcla con suelo gL ⁻¹					
Día 1. 26-Ago.	a 20 °C			a <5 °C		
Concentración	1	5	10	1	5	10
Homogeneidad	+	++++	++++	+	++++	++++
Intensidad	++	++++	++++	++	++++	++++
Brillo	+	++++	++	+	++++	++
Fluorescencia	++	++++	++++	++	++++	++++
	Mezcla con suelo gL ⁻¹					
Día 2. 27-Ago.	a 20 °C			a <5 °C		
Concentración	1	5	10	1	5	10
Homogeneidad						
Intensidad						
Brillo	+	++++	++	+	+++	+
Fluorescencia						
	Mezcla con suelo gL ⁻¹					
Día 5. 30-Ago.	a 20 °C			a <5 °C		
Concentración	1	5	10	1	5	10
Homogeneidad	-	++++	++++	++++	++++	++++
Intensidad	-	+/-	++	+	++	+++
Brillo	-	-	+	-	++	++
Fluorescencia	-	+/-	++	+	++	+++
	Mezcla con suelo gL ⁻¹					
Día 6. 31-Ago.	a 20 °C			a <5 °C		
Concentración	1	5	10	1	5	10
Homogeneidad	-	-	++++	-	++++	++++
Intensidad	-	-	+	-	+	+
Brillo	-	-	+	-	++	++
Fluorescencia	-	+/-	+	+	++	++
Clave:	Nulo	Casi nulo	Bajo	Medio	Alto	Máximo
	-	+/-	+	++	+++	++++

Cuadro VII.14. Matriz de seguimiento del colorante en solución.

	Solución gL ⁻¹					
Día 1. 26-Ago.	a 20 °C			a <5 °C		
Concentración	1	5	10	1	5	10
Homogeneidad	++++	++++	++++	++++	++++	++++
Intensidad	++	++++	++++	++	++++	++++
Brillo	+	++++	++	+	++++	++
Fluorescencia	++++	+++	++	++++	+++	++
	Solución gL ⁻¹					
Día 2. 27-Ago.	a 20 °C			a <5 °C		
Concentración	1	5	10	1	5	10
Homogeneidad						
Intensidad						
Brillo	++++	++	+	++++	++	+
Fluorescencia						
	Solución gL ⁻¹					
Día 5. 30-Ago.	a 20 °C			a <5 °C		
Concentración	1	5	10	1	5	10
Homogeneidad	++++	++++	++++	++++	++++	++++
Intensidad	+++	+	-	+/-	++	++++
Brillo	+++	++	+/-	++++	+++	+
Fluorescencia	+++	+	+/-	++++	++	+
	Solución gL ⁻¹					
Día 6. 31-Ago.	a 20 °C			a <5 °C		
Concentración	1	5	10	1	5	10
Homogeneidad	++++	++++	++++	++++	++++	++++
Intensidad	++++	++	+	+++	++	+
Brillo	+++	++	+	++++	++	+
Fluorescencia	+++	++	+	+++	++	+
Clave:	Nulo	Casi nulo	Bajo	Medio	Alto	Máximo
	-	+/-	+	++	+++	++++

Dado que se dio en las matrices una nomenclatura de cruces, (cuadro VII.13 y VII.14), se trasladaron para fines prácticos a valores numéricos (cuadro VII.15).

Cuadro VII.15. Nomenclatura

Nomenclatura	Valor
-	0
+	1
++	2
+++	3
++++	4

Este código numérico se utilizó para observar los resultados en forma de gráfica. Es importante resaltar que el análisis realizado es de tipo cualitativo.

VII.2.1 Degradación De Fluorescein En La Mezcla Suelo-Colorante.

VII.2.1.1 Intensidad

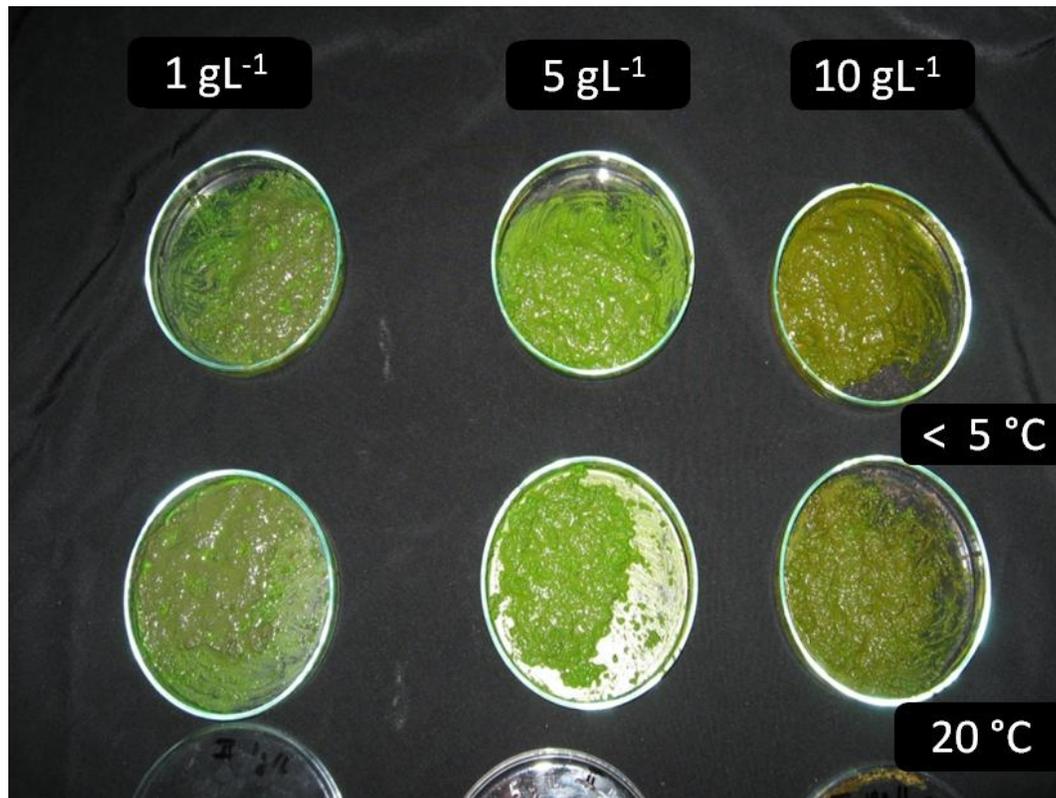


Figura VII.13. Imagen tomada el día 1 (26 de agosto), evidenciando una coloración intensa de las mezclas.

La Figura VII.13 muestra el arreglo de las cajas Petri donde de izquierda a derecha corresponde a las concentraciones 1, 5 y 10 gL⁻¹, la línea superior corresponde a las cajas almacenadas a < 5 °C y la línea inferior corresponde a las cajas almacenadas en el cuarto de temperatura constante a 20 °C.

Al ser el inicio del experimento (día 1), la degradación en mezcla, no se muestra una diferencia aparentemente, sin embargo las intensidades son más evidentes en las concentraciones correspondientes a 5 y 10 gL⁻¹.

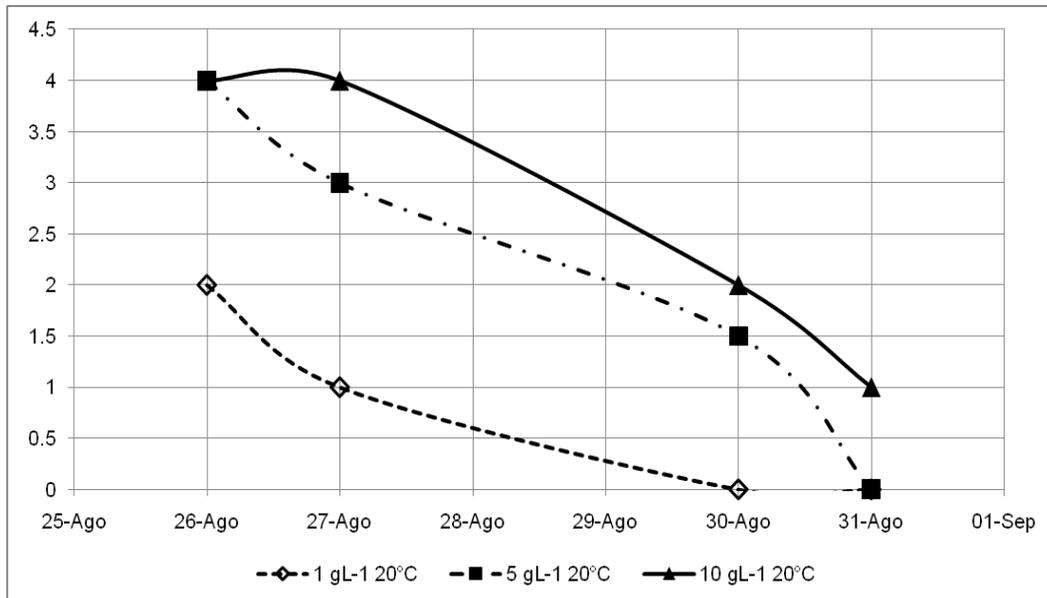


Figura VII.14. Gráfica elaborada con la comparación de la intensidad entre concentraciones de la mezcla suelo-colorante, almacenadas a una temperatura de 20 °C.

La intensidad se observa, figura VII.14, muy disminuida a partir del cuarto día siendo constante solo para la concentración de 10 gL⁻¹.

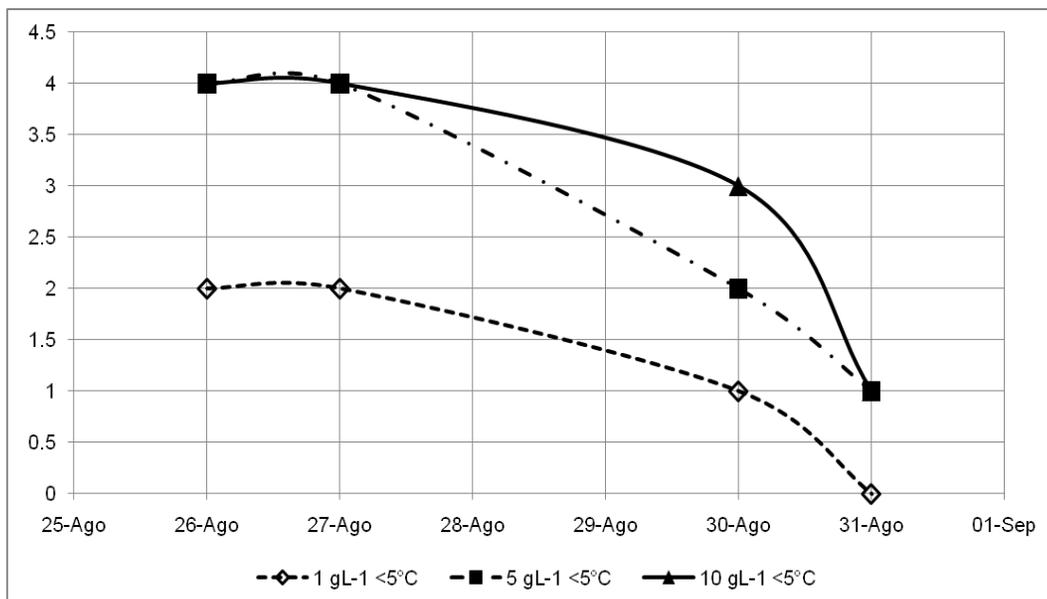


Figura VII.15. Gráfica elaborada con la comparación de la intensidad entre concentraciones de la mezcla suelo-colorante, almacenadas a una temperatura < 5 °C.

A una temperatura menor a 5 °C la intensidad del color se conserva por más tiempo, casi por 5 días en el tratamiento de las concentraciones 5 y 10 gL⁻¹, de acuerdo a la figura VII.15.

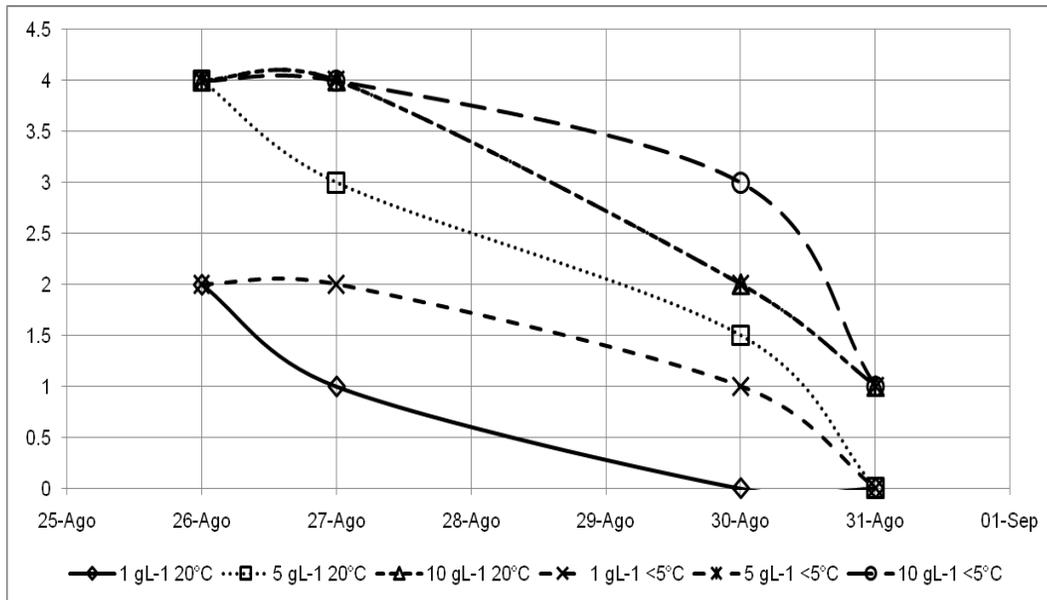


Figura VII.16. Gráfica elaborada con la comparación de la intensidad entre mezclas suelo-colorante de tres concentraciones, a dos temperaturas de almacenamiento: 20 °C versus < 5 °C.

En la figura VII.16 se realiza la comparación entre las dos temperaturas donde se ve más favorecida las mezclas almacenadas a < 5 °C, este resultado refleja la disminución de la tasa de degradación del colorante, la intensidad observada se mantuvo cerca de 6 días.

La concentración del colorante 5 gL⁻¹ y 10 gL⁻¹ se mantienen más estables durante todo el desarrollo, primer indicio de encontrar una concentración con una intensidad uniforme.

VII.2.1.2 Brillo

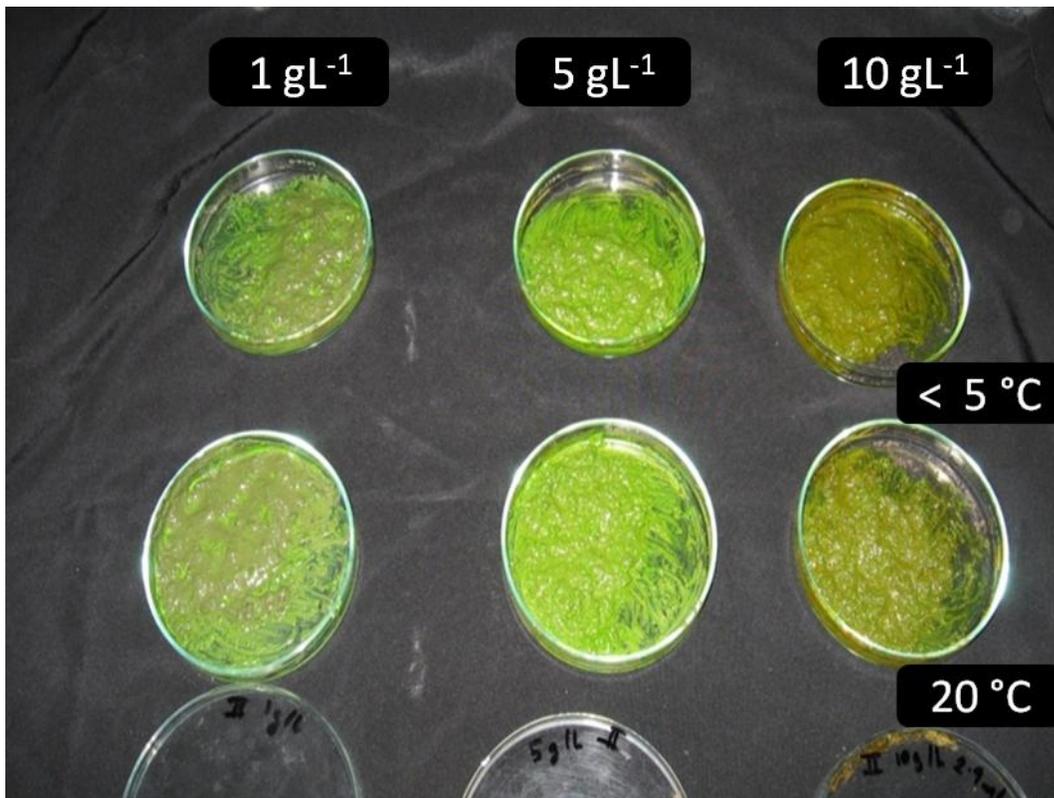


Figura VII.17. Imagen representativa del brillo evaluado en las mezclas de suelo-colorante.

Se observó un alto brillo en las concentraciones 5 y 10 gL⁻¹ al inicio de la evaluación lo cual se evidencia en la Figura VII.17 tomada el 26 de agosto, (día 1) de izquierda a derecha 1, 5 y 10 gL⁻¹.

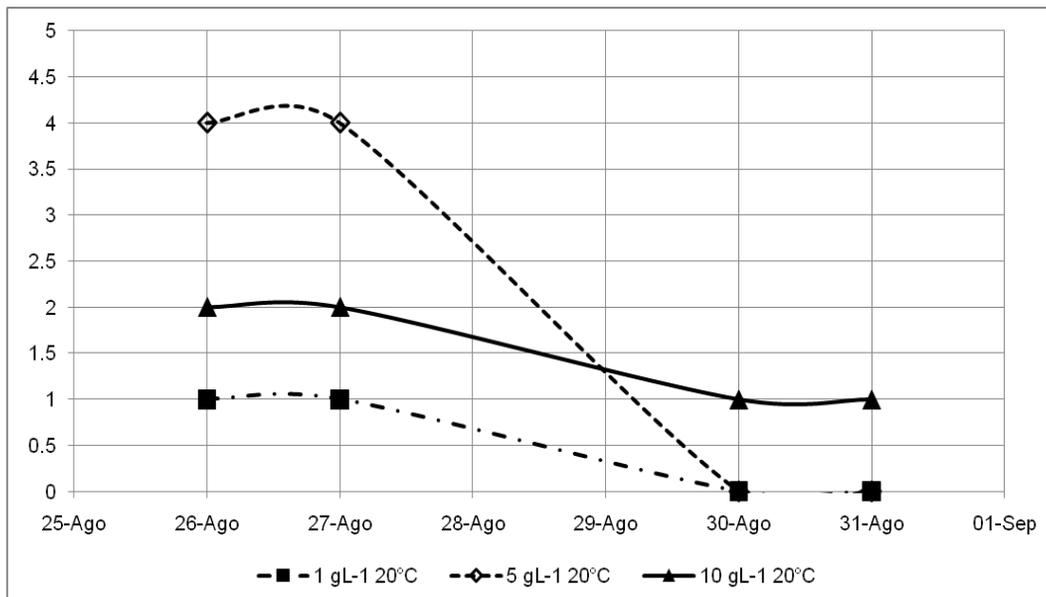


Figura VII.18. Gráfica elaborada con la comparación del brillo entre concentraciones de la mezcla suelo-colorante, almacenadas a una temperatura de 20 °C.

De acuerdo a las observaciones realizadas el brillo fue mayor en la concentración de 5 gL⁻¹ esto se ve sumamente disminuido hacia el día 5, figura VII.18, sin embargo la concentración de 10 gL⁻¹ se mantiene más uniforme hasta completar el día 6 sin variación alguna.

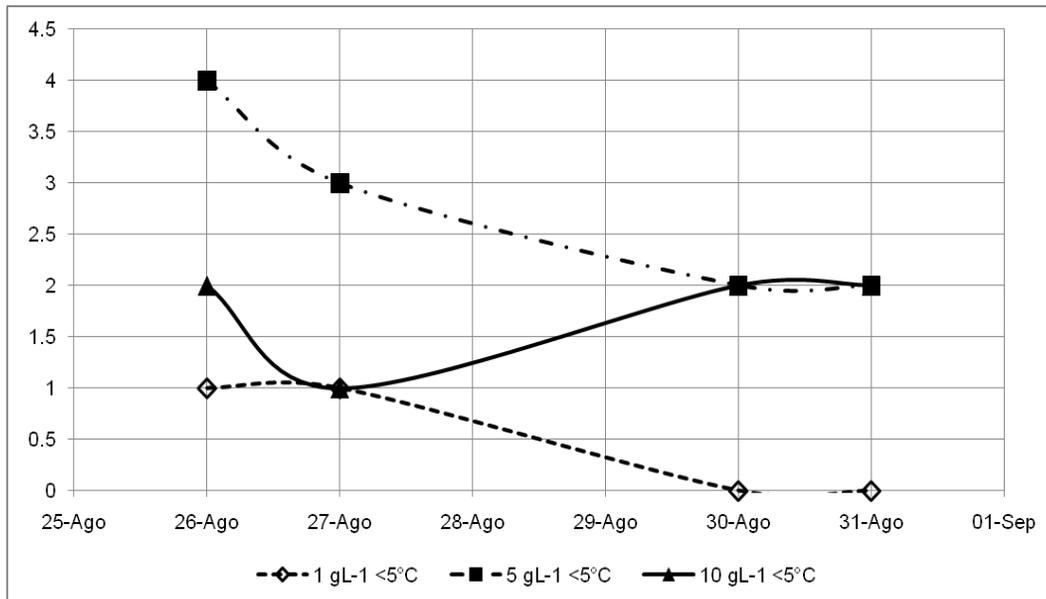


Figura VII.19. Gráfica elaborada con la comparación del brillo entre concentraciones de la mezcla suelo-colorante, almacenadas a una temperatura < 5 °C.

El brillo que se observó en las concentraciones de 5 y 10 gL⁻¹ se mantuvo de forma más uniforme durante la evaluación, caso contrario que la concentración de 1 gL⁻¹ el cual se perdió hacia el 5 día como lo muestra la figura VII.19.

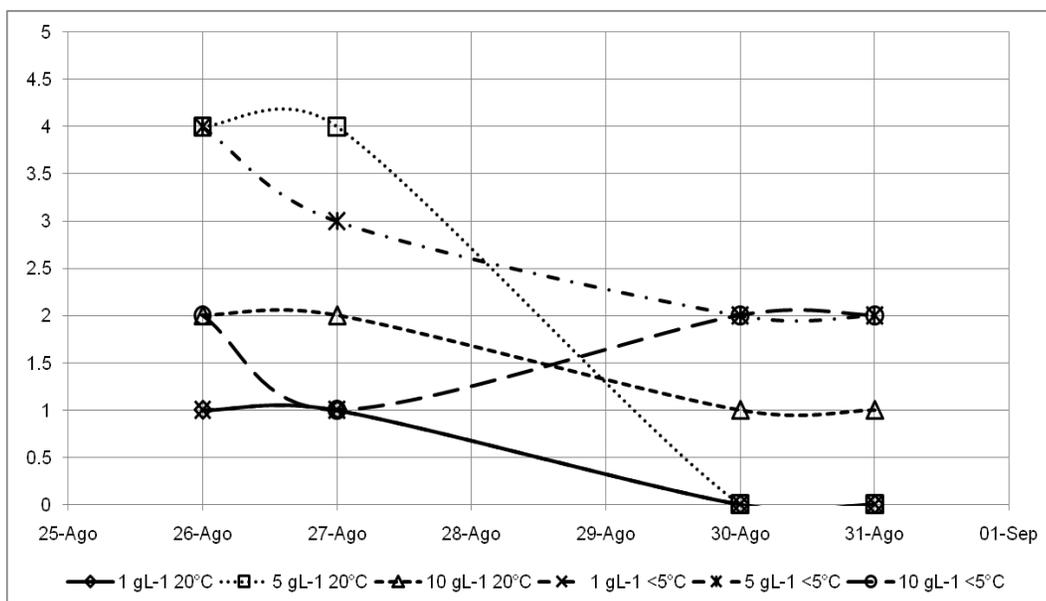


Figura VII.20. Gráfica elaborada con la comparación del brillo entre mezclas suelo-colorante de tres concentraciones, a dos temperaturas de almacenamiento: 20 °C versus < 5 °C.

Cuando se realiza la comparación entre las temperaturas y las concentraciones como se observa en la figura VII.20 que las concentraciones más estables son 10 gL⁻¹ y 5 gL⁻¹ en ambas temperaturas, esto por un periodo de dos días sin variaciones.

VII.2.1.3 Fluorescencia:

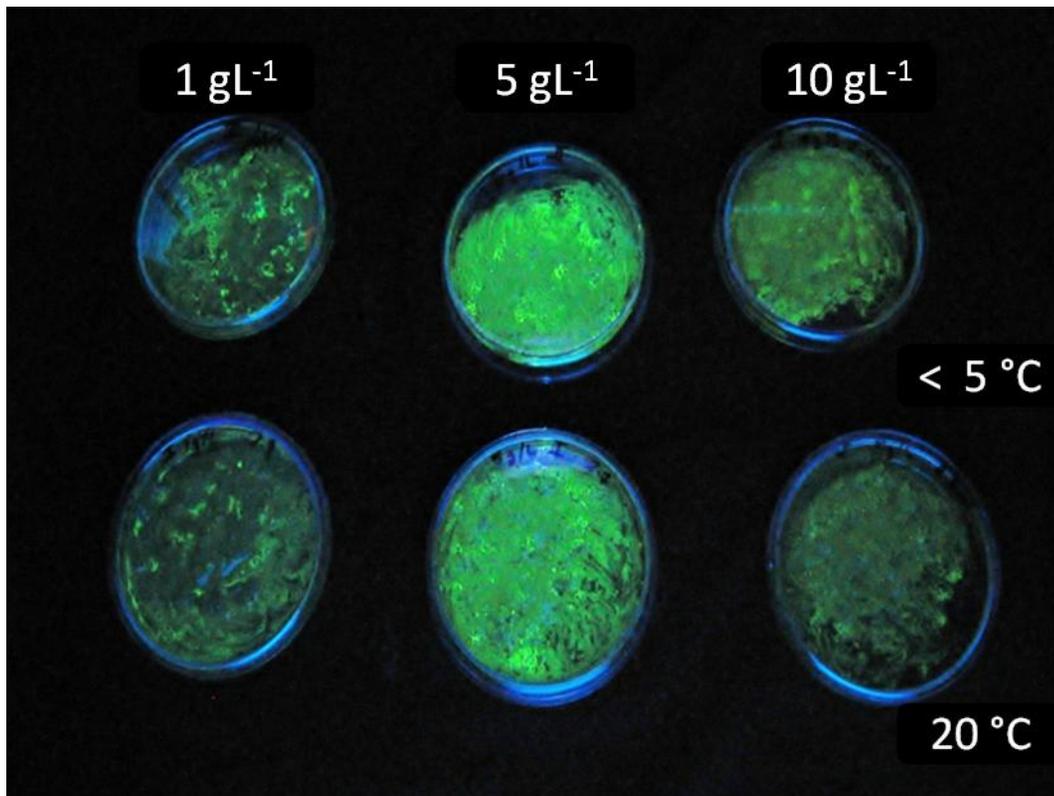


Figura VII.21. Imagen tomada bajo excitación de luz UV emitida por una lámpara de luz negra, para resaltar la fluorescencia del colorante en la mezcla suelo-colorante

La Figura VII.21 representa la fluorescencia de las cajas Petri cuyas concentraciones son de izquierda a derecha: 1, 5 y 10 gL⁻¹ respectivamente. Las imágenes muestran una evidente alta luminosidad en las concentraciones de 5 gL⁻¹ así como en la concentración de 1 gL⁻¹, esta última debida a que la disolución permite una mejor excitación del colorante causado por la luz UV.

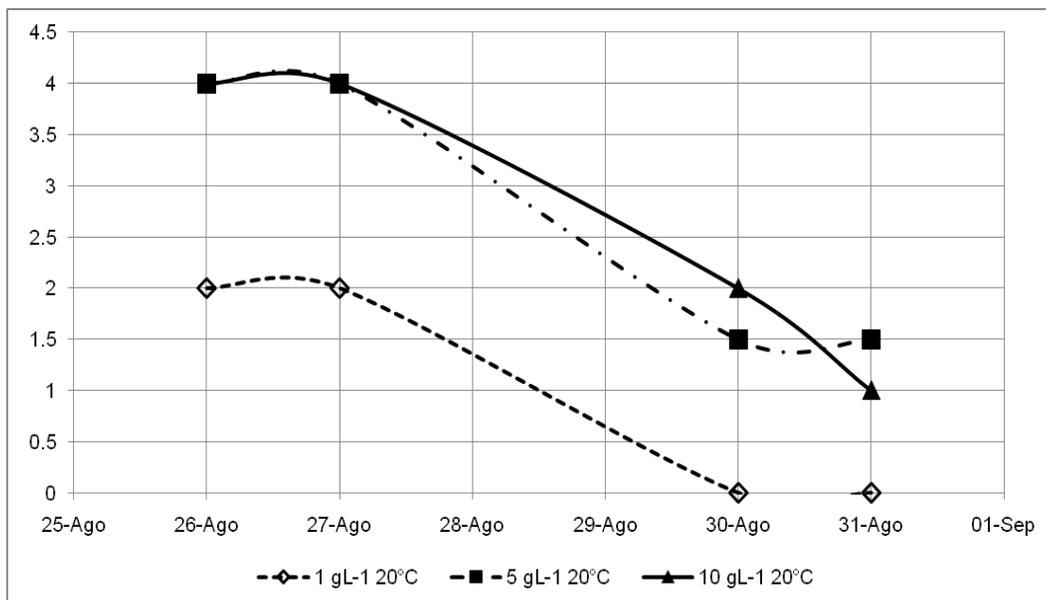


Figura VII.22. Gráfica elaborada con la comparación de la fluorescencia entre concentraciones de la mezcla suelo-colorante, almacenadas a una temperatura de 20 °C.

Se observa que la fluorescencia (Figura VII.22), de la solución a la concentración de 1 gL^{-1} , disminuye a cero después de transcurridos 5 días, es decir, al quinto día después de hecha la mezcla suelo-colorante, no se hace visible la excitación bajo luz negra.

La concentración correspondiente a 10 gL^{-1} tiene un descenso de una unidad hacia el día sexto, lo cual según el comportamiento de la gráfica e interpolando, perdería su capacidad de emitir fluorescencia para el día 7.

La concentración 5 gL^{-1} tiene un comportamiento uniforme, es decir, la fluorescencia se mantiene hasta el sexto día.

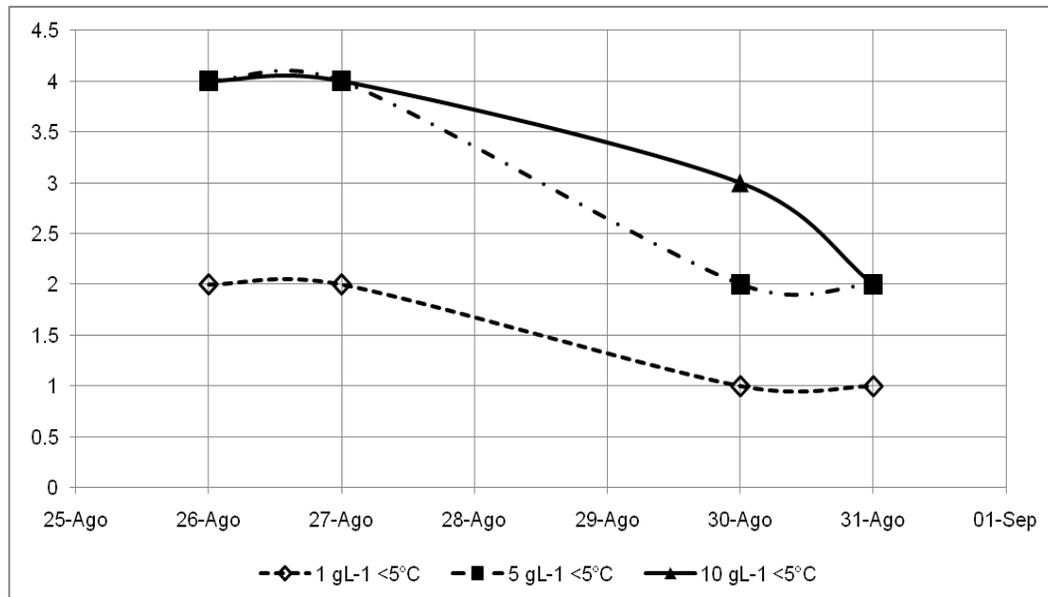


Figura VII.23. Gráfica elaborada con la comparación de la fluorescencia entre concentraciones de la mezcla suelo-colorante, almacenadas a una temperatura $< 5 \text{ }^\circ\text{C}$.

Las mezclas que se almacenaron a una temperatura menor a $5 \text{ }^\circ\text{C}$ tienen una conducta muy similar a las observadas a $20 \text{ }^\circ\text{C}$ (Figura VII.22 y Figura VII.23).

La mezcla cuya concentración es de 10 gL^{-1} tiene un comportamiento descendente hacia el día 6. La mezcla de concentración 5 gL^{-1} se mantiene hacia el día 5 y 6 lo cual nos da un buen resultado de fluorescencia si se realizara una lectura del colorante dentro de estos días.

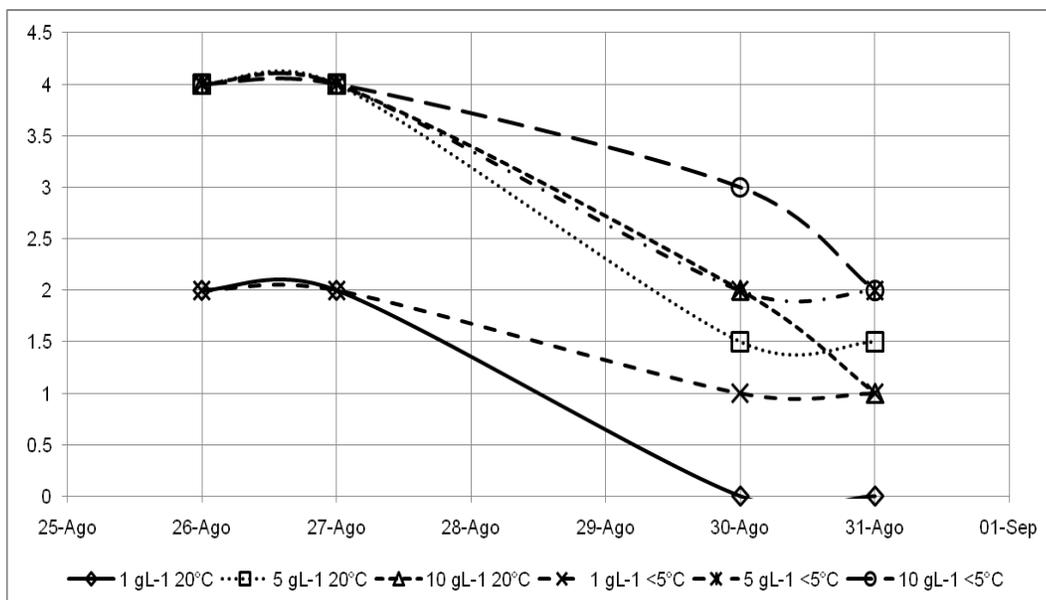


Figura VII.24. Gráfica elaborada con la comparación de la fluorescencia entre mezclas suelo-colorante de tres concentraciones, a dos temperaturas de almacenamiento: 20 °C versus < 5 °C.

Cuando se analiza la gráfica comparativa de las muestras de concentración 5 gL⁻¹ almacenadas tanto a 20 °C como a < 5 °C, figura VII.24, tienen un comportamiento más estable que las otras dos. Sin embargo la fluorescencia se ve más favorecida en una temperatura fría que en una cálida, causada probablemente por la actividad microbiana.

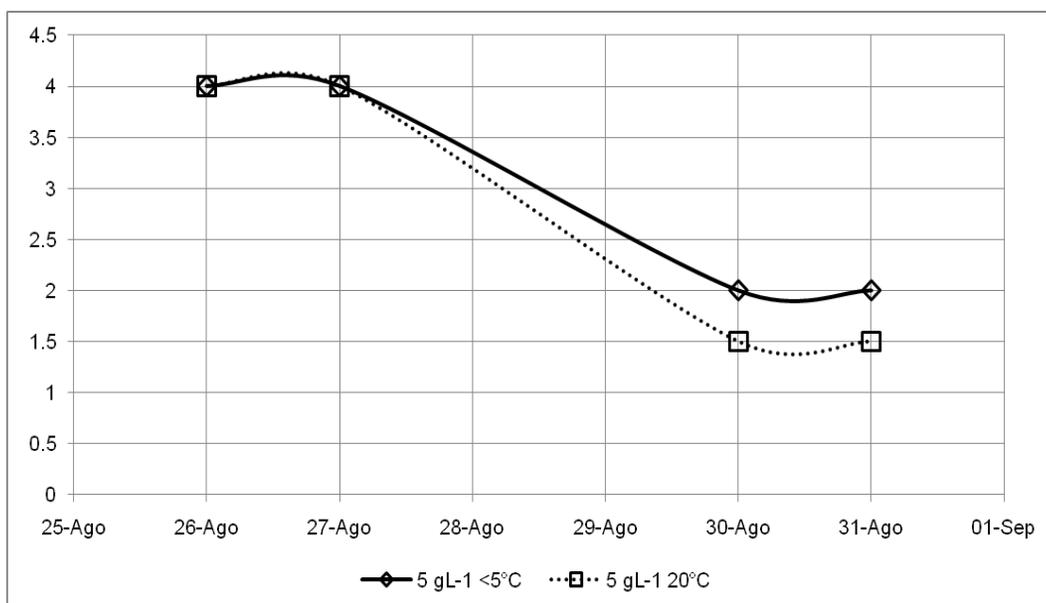


Figura VII.25. Gráfica elaborada de la fluorescencia en la mezcla suelo-colorante de 5 gL⁻¹, a dos temperaturas de almacenamiento: 20 °C versus 5 °C.

La estabilidad de la fluorescencia en la concentración de 5 gL⁻¹ se puede apreciar más en la figura VII.25.

En la figura VII.25 con línea punteada se observa el comportamiento de fluorescencia a 20 °C de la mezcla colorante-suelo con la concentración de 5 gL⁻¹, en esta se puede observar claramente que su degradación es uniforme hacia el 5 y 6 día manteniéndose constante.

Sin embargo en línea continua se observa el comportamiento de la mezcla colorante-suelo con la concentración similar, este tiene un valor más alto para los mismos días (5 y 6), esto en una temperatura menor a 5 °C.

De acuerdo a los datos obtenidos y análisis de las gráficas comparativas se obtiene como resultado preliminar que la concentración del colorante óptimo es de 5 gL⁻¹, para fines de fluorescencia, tanto a 20 °C como a < 5 °C , sin embargo, en esta ultima los resultados visibles son mas benéficos para fines de detección de rutas de flujo.

La concentración correspondiente a 10 gL⁻¹ tiene buenos resultados al momento que se aplica sin embargo su poder como colorante fluorescente se ve rebasado por la alta concentración de este, concentración que no permite el paso de la luz y con esto la excitación del mismo con la luz UV.

La fluorescencia de la concentración a 1 gL⁻¹ es muy baja después de 3 días de aplicación.

VII.2.2 Degradación De Fluorescein En Solución.

El experimento se desarrollo durante 6 días a la par de la degradación de la mezcla de suelo-colorante, los parámetros evaluados fueron la intensidad, brillo y fluorescencia.

Similar a lo realizado con la mezcla suelo-colorante, se prepararon soluciones a las concentraciones 1, 5 y 10 gL⁻¹. Una muestra de cada concentración fue almacenada en el cuarto frío (T<5 °C) y una muestra de cada concentración fue almacenada a 20 °C. En ambos casos las muestras fueron protegidas de la luz natural.

A continuación se describen cada una de las características evaluadas.

VII.2.2.1 Intensidad

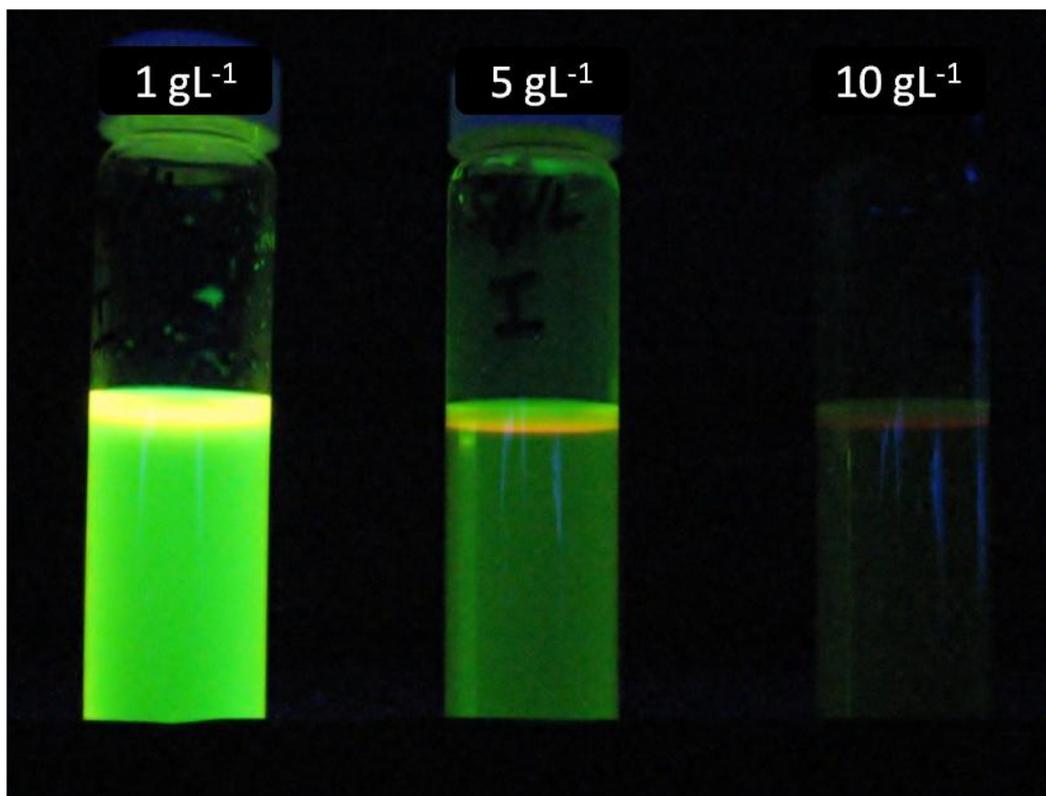


Figura VII.26. Imagen tomada el 26 de agosto, colorante en solución a tres concentraciones.

En la figura VII.26 se observa las soluciones del colorante cuyas concentraciones de izquierda a derecha son: 1, 5 y 10 gL⁻¹ respectivamente; se puede ver que la intensidad es más fuerte en 1 gL⁻¹ esto causado a que la baja concentración del colorante permite el paso de luz entre sus moléculas y consecuentemente la excitación de estas, permitiendo al observador tener una intensidad lumínica alta.

El efecto anterior se puede observar también en la concentración de 5 gL⁻¹, sin embargo, en este se aprecia una disminución en la intensidad ya que la concentración aumenta 5 veces, la luz penetra la solución pero con dificultad.

Finalmente la concentración del colorante correspondiente a 10 gL⁻¹ solo se ve con intensidad lumínica en las paredes del frasco ya que la luz encuentra más resistencia para pasar entre las moléculas y no puede excitarlas.

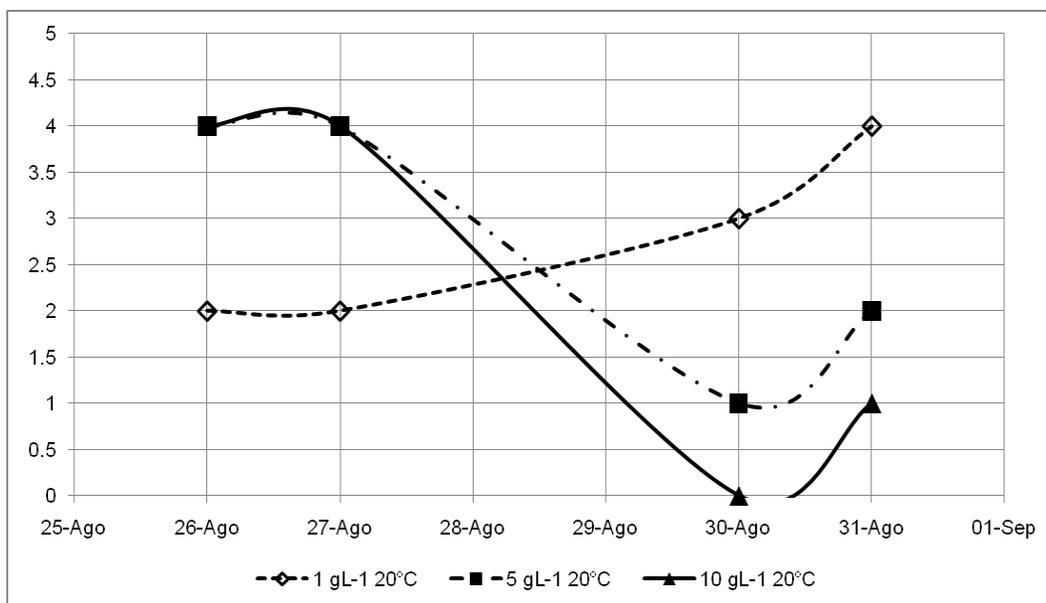


Figura VII.27. Gráfica elaborada con la comparación de la intensidad entre concentraciones del colorante en solución, almacenadas a una temperatura de 20 °C.

En la figura VII.27 se puede observar que en solución el colorante sufre una degradación lenta sin embargo se degrada a menor velocidad que en la mezcla suelo-colorante.

En solución, las observaciones son muy poco uniformes como es el caso de la concentración de 1 gL⁻¹ ya que al ser agitados los frascos, el colorante que se queda retenido en las paredes por las fuerzas de cohesión, da la apariencia de un aumento de la intensidad de la coloración, acentuando aparentemente la intensidad.(figura VII.27).

Las concentraciones de 5 y 10 gL⁻¹ aparentan tener una disminución hacia el día 5 y una recuperación al día siguiente de un valor; para el día 5 la concentración de 10 gL⁻¹ da la apariencia de haber perdido la intensidad del color, y al día siguiente, debido a la agitación, se muestra otra vez intensa, esto se sostiene debido a que al tener una gran concentración se permite tener una excitación del colorante con el movimiento.

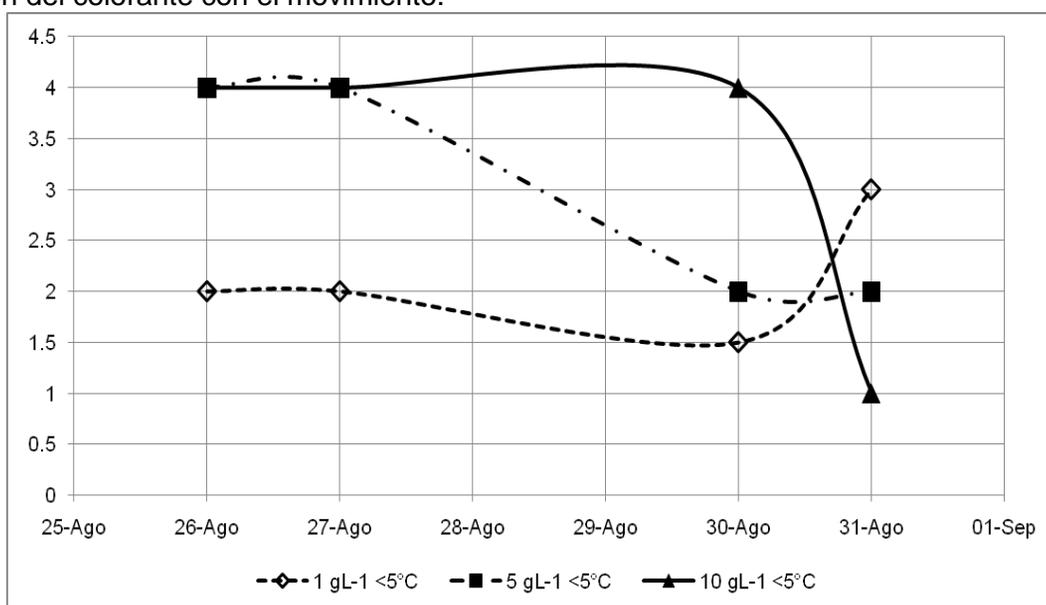


Figura VII.28. Gráfica elaborada con la comparación de la intensidad entre concentraciones del colorante en solución, almacenadas a una temperatura < 5 °C.

En el análisis de las soluciones almacenadas a una temperatura inferior a 5 °C (figura VII.28), se observó que la transportación de las muestras, del cuarto frío al cuarto oscuro y de temperatura constante, afectaba la apreciación correcta de la intensidad debido a la agitación sufrida en el trayecto, esto se ve reflejado, principalmente, en las soluciones de concentración 1 y 10 gL⁻¹.

La solución de concentración de 5 gL⁻¹ tiene un comportamiento más uniforme manteniéndose con buena intensidad al menos por los dos últimos días de observación.

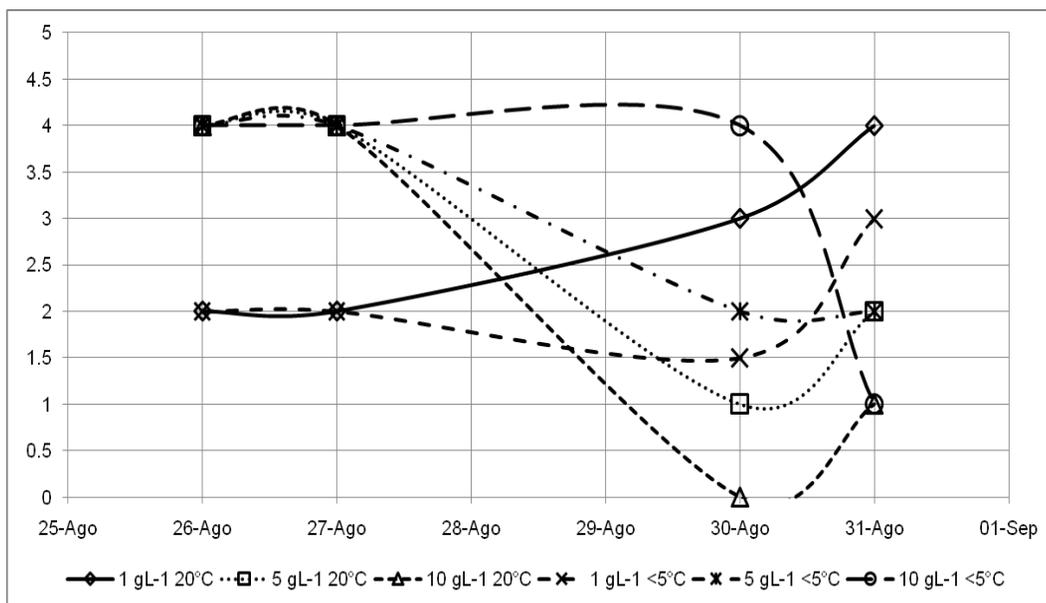


Figura VII.29. Gráfica comparativa de las soluciones de las tres concentraciones evaluadas a las dos temperaturas de almacenamiento: 20 °C versus < 5 °C

En la figura VII.29 se puede observar que las concentraciones de 5 gL⁻¹ son las únicas en ambas temperaturas que se comporta aparentemente más uniformes, no obstante la agitación debida al traslado del cuarto frío al cuarto oscuro y de temperatura constante.

Las concentraciones de 10 gL⁻¹ son inversos sus comportamientos, es decir , la muestra almacenada a 20 C disminuye , mientras que la muestra almacenada a menos 5 °C se mantiene constante, por otro lado las concentraciones de 1 gL⁻¹ son muy iguales siendo superior la intensidad a final de la evaluación, tal y como lo muestra la figura VII.29.

VII.2.2.2 Brillo:

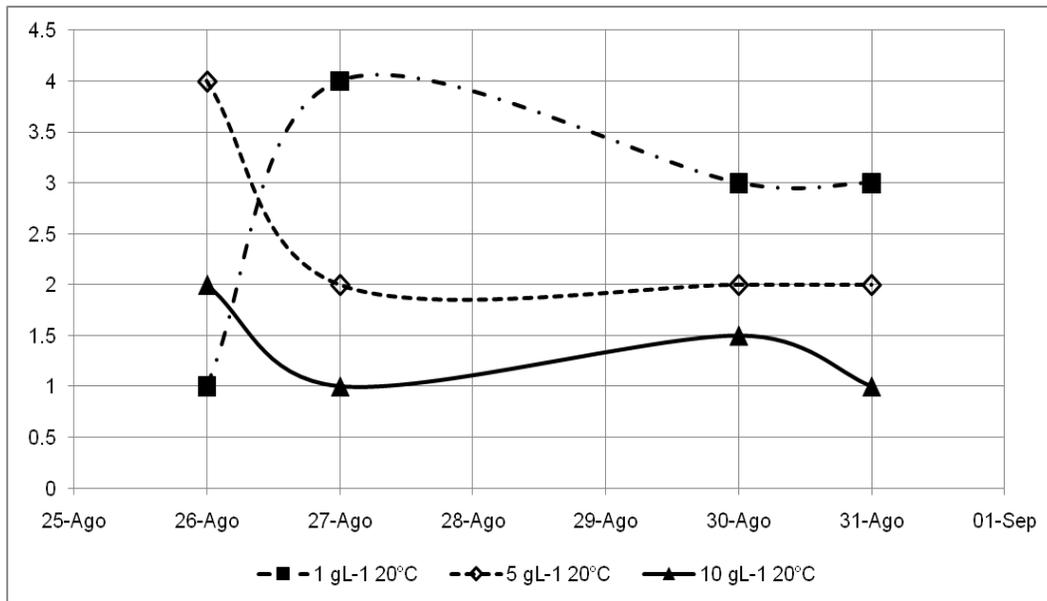


Figura VII.30. Gráfica elaborada con la comparación del brillo entre concentraciones del colorante en solución, almacenadas a una temperatura de 20 °C.

La solución de concentración 5 gL⁻¹ muestra el mejor comportamiento ya que durante cinco días tuvo un brillo de valor medio, en la figura VII.30 está representado con la línea punteada.

El brillo de la concentración de 10 gL⁻¹ no varió considerablemente, sin embargo, no alcanzo valores mayores debido a la alta concentración del colorante que no deja pasar la luz.

De las tres concentraciones trabajadas con respecto al brillo, el valor más alto lo alcanzo la concentración de 1 gL⁻¹ sin embargo, durante los seis días que duró el experimento, no mostro un comportamiento uniforme.

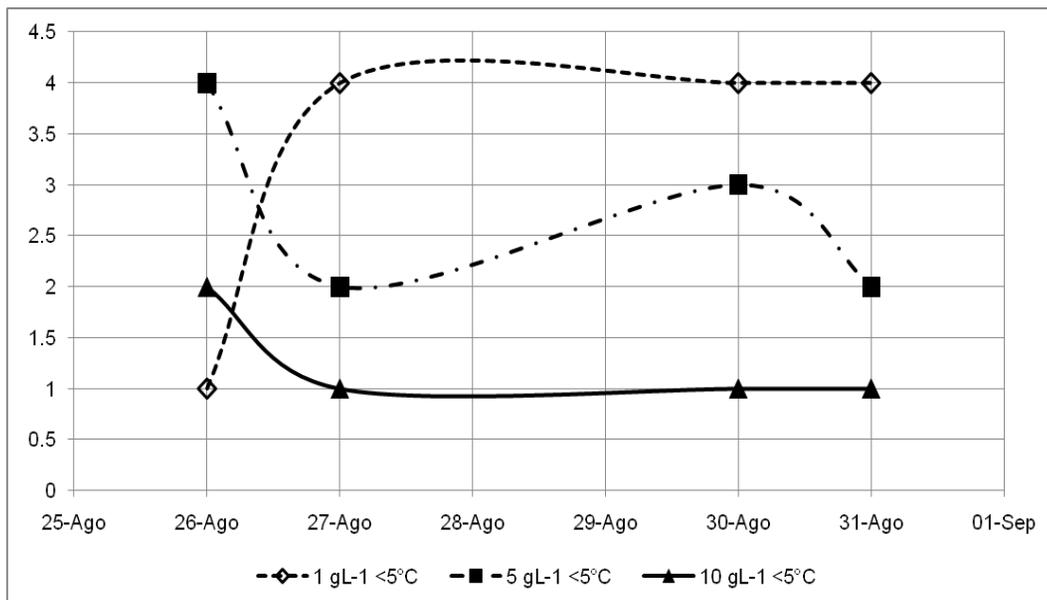


Figura VII.31 Gráfica elaborada con la comparación del brillo entre concentraciones del colorante en solución, almacenadas a una temperatura < 5 °C.

En almacenamiento a temperatura inferior a 5 °C, la concentración de 1 gL⁻¹ de colorante se mantiene uniforme desde el día 2 con valores altos, de forma inversa, la concentración de 10 gL⁻¹ se mantiene uniforme desde el día 2 pero con valores muy bajos. El comportamiento de altibajos lo desarrolla la concentración de 5 gL⁻¹ sin embargo no varió mucho como para considerarse poco estable figura VII.31.

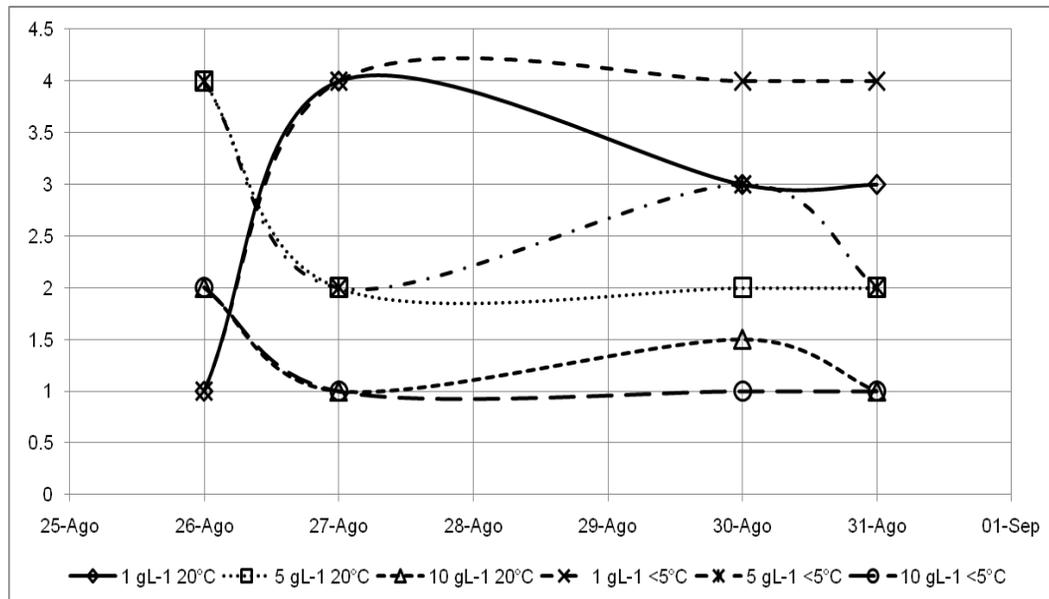


Figura VII.32. Gráfica elaborada con la comparación del brillo entre soluciones de tres concentraciones, a dos temperaturas de almacenamiento: 20 °C versus < 5 °C.

A manera de conclusión para el parámetro de brillo, Las soluciones de las tres concentraciones se comportan uniformes a las dos temperaturas de almacenamiento, tanto a 20 como a < 5 °C, las concentraciones a 1 gL⁻¹ se mantienen con valores altos y los valores mínimos se presentan en la concentración a 10 gL⁻¹, los valores medios se presentan con las concentraciones a 5 gL⁻¹ véase figura VII.32.

VII.2.2.3 Fluorescencia

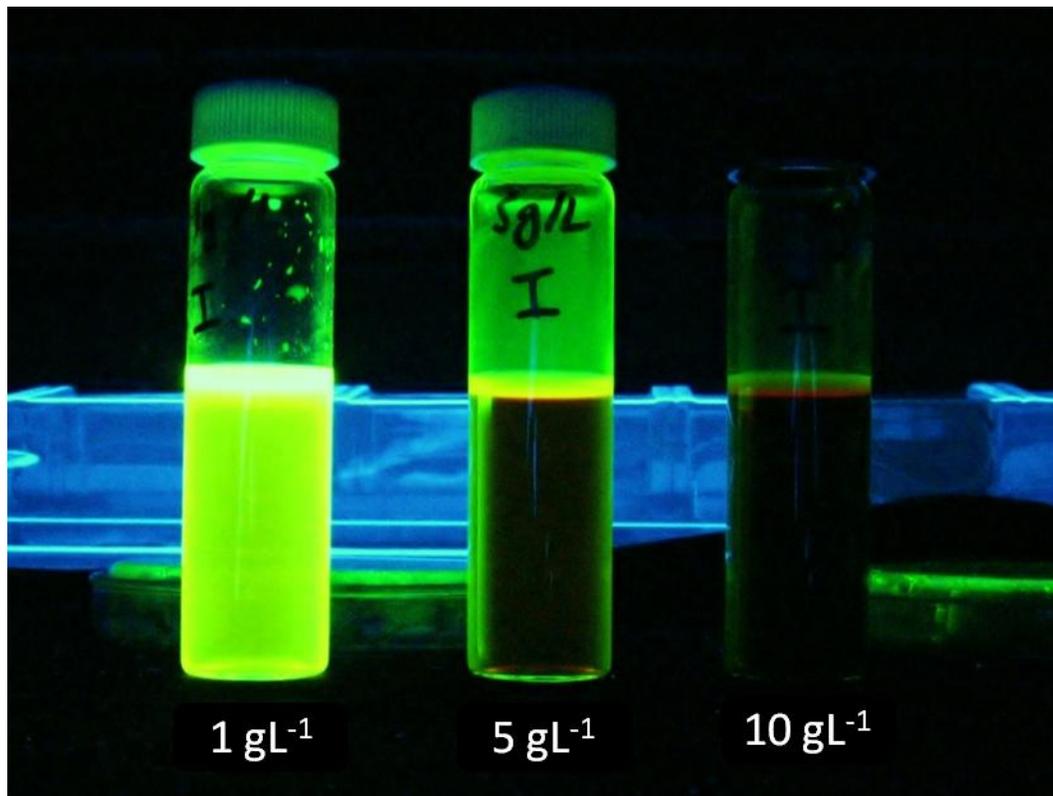


Figura VII.33. Imagen representativa de fluorescencia bajo luz negra en concentraciones 1, 5 y 10 gL⁻¹.

La figura VI.33 fue tomada bajo la excitación de luz UV con lámpara de luz negra, de izquierda a derecha las concentraciones son 1, 5 y 10 gL⁻¹.

La primera concentración, figura VII.33, presenta una fluorescencia muy marcada, esto es porque la baja concentración permite una menor resistencia al paso de la luz UV y por ende da como reacción una alta emisión de fluorescencia, comparado con la reacción que sufre la solución con la concentración de 10 gL⁻¹ esta presenta una muy baja fluorescencia que solo es visible en las paredes del frasco donde las moléculas pueden tener un mayor contacto con la estimulación de la luz negra.

La concentración de 5 gL⁻¹ es la que presenta una fluorescencia intermedia.

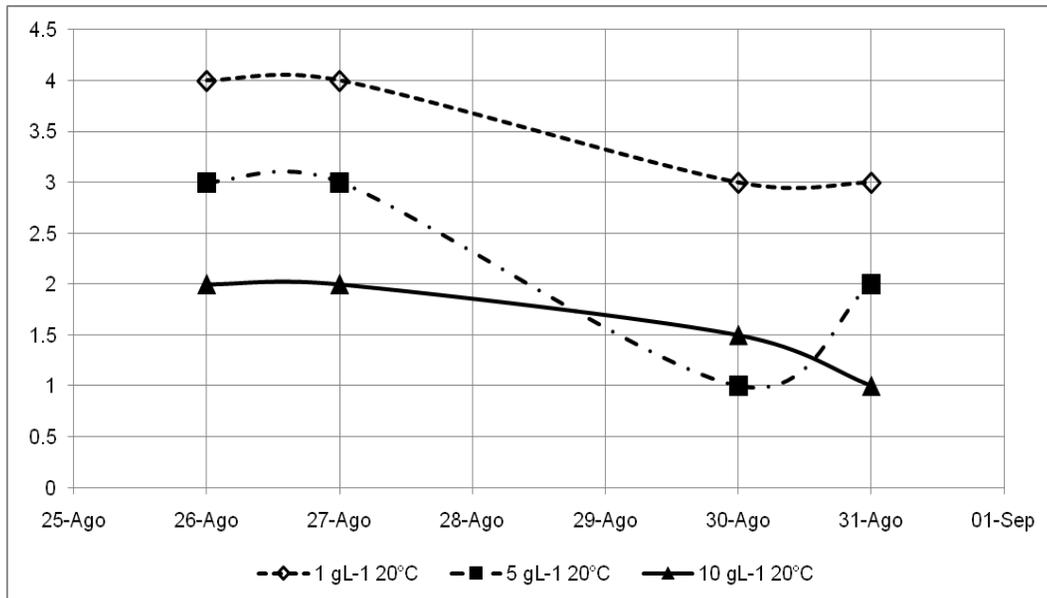


Figura VII.34. Gráfica elaborada con la comparación de la fluorescencia entre concentraciones del colorante en solución, almacenadas a una temperatura de 20 °C.

La figura VII.34 muestra de cómo la concentración de 1 gL⁻¹ almacenada a 20 °C presenta una mayor fluorescencia teniendo una degradación muy baja comparada con respecto a las otras concentraciones. Las dos concentraciones restantes presentan la misma conducta, solo se degradaron una unidad de valor.

Los resultados nos indican que las soluciones del colorante, independientemente de la concentración, mantienen una fluorescencia constante con una degradación muy baja, esto presente a una temperatura de 20 °C.

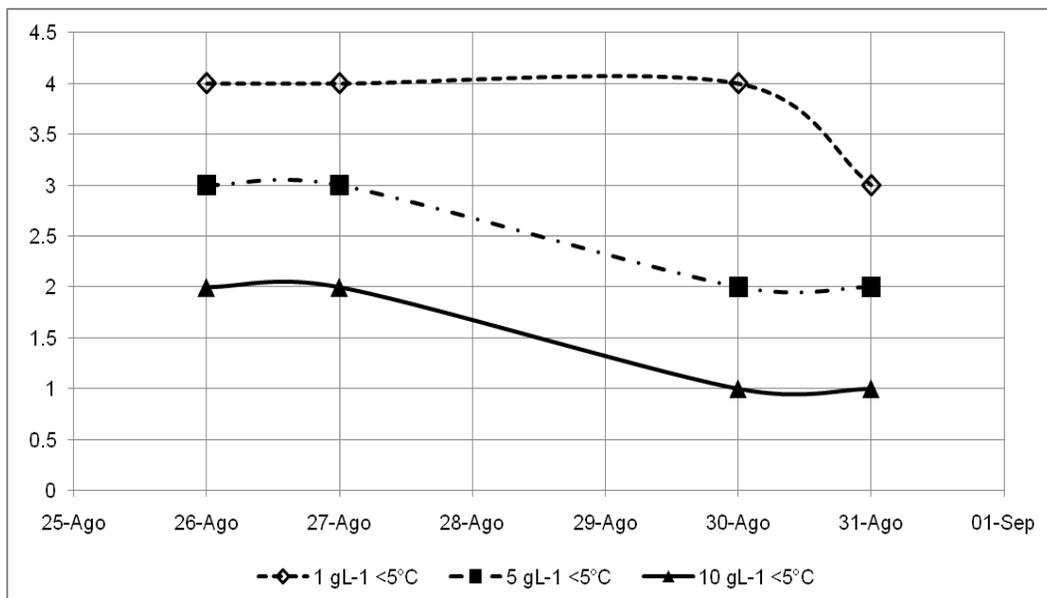


Figura VII.35. Gráfica elaborada con la comparación de la fluorescencia entre concentraciones del colorante en solución, almacenadas a una temperatura < 5 °C.

En la figura VII.35 se muestran las conductas de las soluciones almacenadas a una temperatura menor a 5 grados presentan una degradación mínima, se consideran estables, las diferencias entre los valores dependen directamente de la concentración presente en la solución.

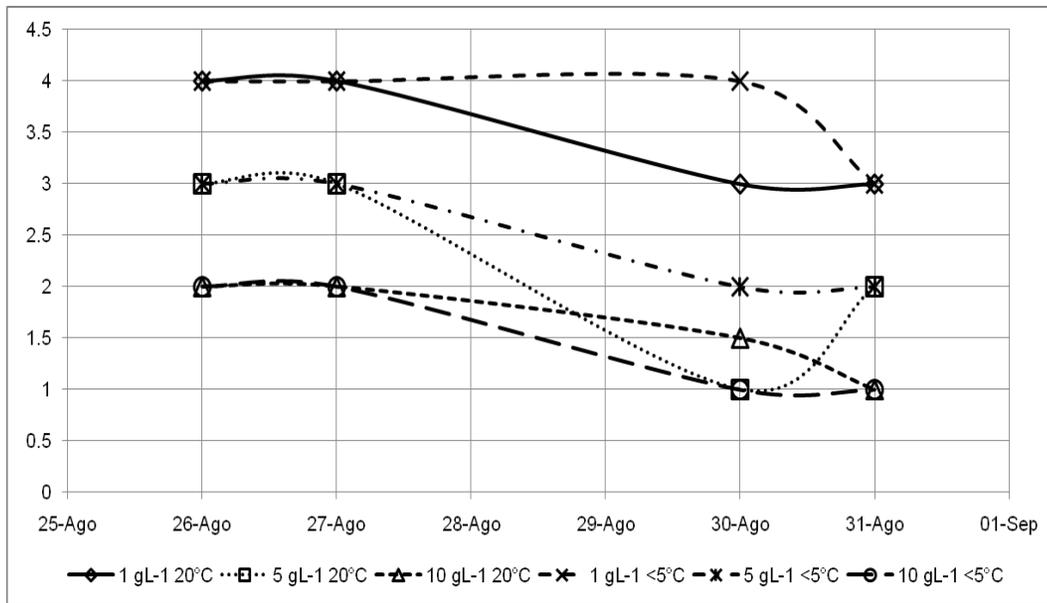


Figura VII.36. Gráfica elaborada con la comparación de la fluorescencia entre soluciones de tres concentraciones, a dos temperaturas de almacenamiento: 20 °C versus < 5 °C.

En la figura VII.36 se compararon las soluciones almacenadas tanto a 20 °C contra las almacenadas a 5 °C, es posible ver la similitud en la degradación mínima que sufren en el parámetro de fluorescencia, sin embargo es muy marcado el hecho de que las concentraciones altas presentan un valor bajo de fluorescencia, las concentraciones intermedias presentan una fluorescencia media, y las concentraciones bajas presentan una mayor fluorescencia, esto siendo independiente de la temperatura a la cual sea almacenada ya que su degradación es mínima.

En resumen a mayor concentración menor fluorescencia y viceversa, a menos concentración mayor fluorescencia.

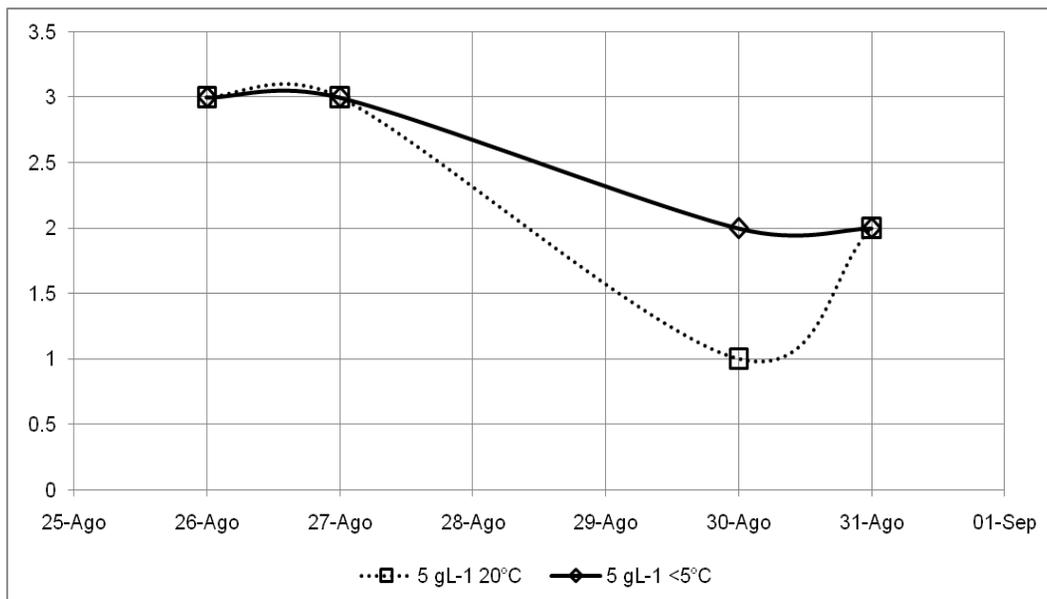


Figura VII.37. Gráfica elaborada de la fluorescencia en la solución de 5 gL⁻¹, a dos temperaturas de almacenamiento: 20 °C versus 5 °C.

Finalmente y en base a los resultados, se considero para fines de la evaluación de las rutas de flujo preferencial el uso de la solución de colorante con la concentración de 5 gL^{-1} ya que su comportamiento, en los parámetros de brillo, intensidad y fluorescencia, fue más uniforme y duradero durante las pruebas (véase figura VII.29, VII.32 y VII.37), por lo tanto para la evaluación de las rutas en los monolitos de suelo intacto se inicio el uso de colorante en concentración de 5 gL^{-1} .

VII.3 METODOLOGÍA FLUORESCEIN (Análisis Del Flujo Preferencial De Agua En Columnas De Suelo)

VII.3.1 Extracción de monolitos

El análisis del flujo preferencial de agua se realizó en columnas de suelo intactas (monolitos), las cuales fueron extraídas *in situ* en el rancho Las Palmas.

Las columnas se extrajeron mediante el siguiente procedimiento

Dentro de la parcela de cultivo, se seleccionaron surcos con superficie sin disturbios y con un mínimo de rastrojo, posteriormente con ayuda de un cuchillo de hoja grande (comúnmente llamado filetero) se inicio el tallado del monolito.

Como primera etapa, se estableció un cuadro y se escarbó para formar un cubo, a una profundidad aproximadamente de 40 cm, la siguiente imagen ilustra cómo se inicio a esculpir el monolito (Figura VII.38).



Figura VII.38. Formación de un cubo con ayuda de un cuchillo, sobre un surco o canal de la siembra

Después de formado el cubo se inicia el tallado del monolito iniciando por las aristas, es decir se le quita la forma cuadrada, para darle una forma cilíndrica como lo muestra la imagen siguiente (Figura VII.39).



Figura VII.39. Tallado de monolito para darle la forma de un cilindro

Una vez finalizado el tallado del monolito se inicia la reducción del diámetro con ayuda del cuchillo, el diámetro de la columna tiene contemplado un cierto espacio aproximadamente medio centímetro entre la pared de la columna y la pared de un molde de acero utilizado para su recuperación sin alterarlo, la finalidad de este espacio fue permitir el alojamiento de la cubierta de espuma protectora.

La columna fue envuelta con el molde de acero y forrada con papel aluminio, posteriormente se procedió con el vaciado del componente plástico precursor de la cubierta de espuma (Espuma de Poliuretano, para vaciado A-B, Clave-61600010, Poliformas Plásticas, SA de CV) este proceso se puede contemplar en la siguiente imagen (Figura VII.40).



Figura VII.40. Columna de suelo (monolito) con molde de acero y espuma.

En la figura VII.40 se observa que la columna aun sigue unida a la base del suelo, en tono gris se contempla el molde de acero, y en blanco se tiene la espuma en formación.

Una vez seca la espuma se extrajo el monolito del suelo con ayuda de una cucharilla o espátula evitando dañar la parte inferior del monolito, para su traslado se envolvió en papel aluminio, como se muestra en la imagen siguiente (Figura VII.41) y se colocó en una hielera para evitar dañar la estructura por choque mecánico durante el traslado al laboratorio.

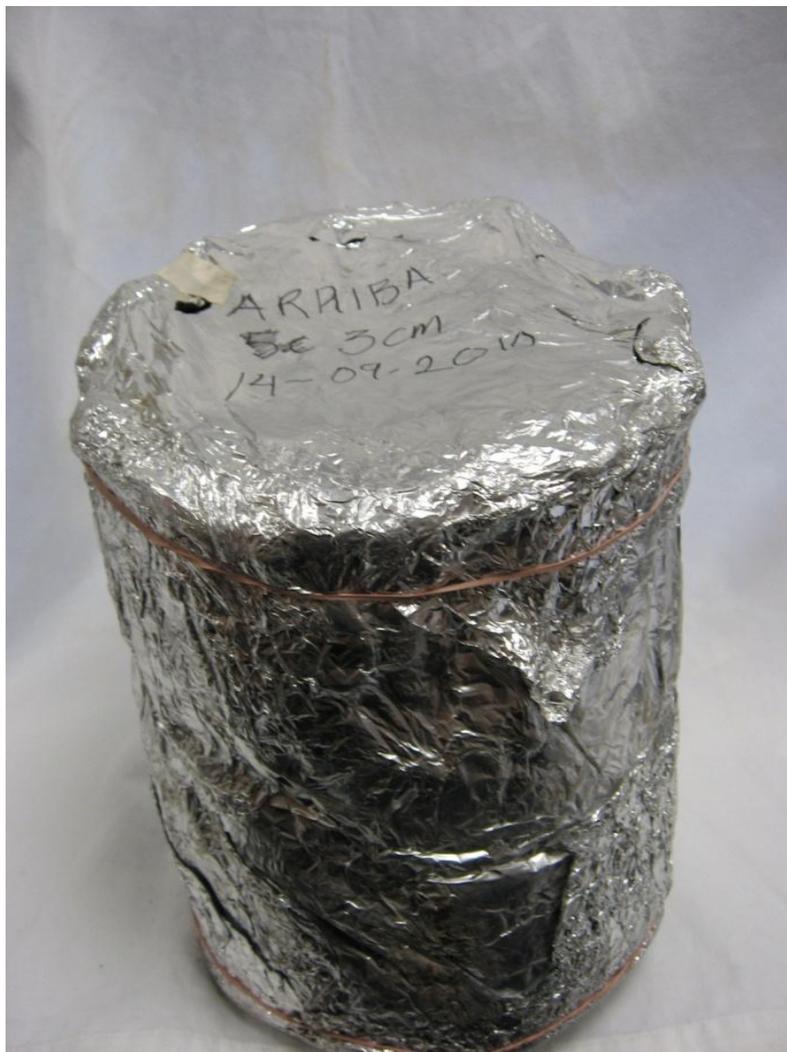


Figura VII.41. Monolito de suelo intacto acondicionado para su traslado y almacenaje.

En el laboratorio fue almacenado en el cuarto frío, donde la temperatura oscila por debajo de los 5 °C, esto para reducir la actividad bacteriana y por ende la descomposición y alteración de la estructura.

VII.3.2 Montaje, aplicación del riego de una solución de colorante y corte de las columnas

VII.3.2.1 El colorante utilizado

El colorante utilizado en los experimentos fue el fluorescein ($C_{20}H_{10}Na_2O_5$). Es un compuesto químico en presentación de polvo o gránulos cuya coloración es rojizo-violeta con un lustre metálico, inodoro, soluble en agua y etanol, insoluble en aceites vegetales.

VII.3.2.2 Cuchilla de cortes

Para el montaje de las columnas de suelo intacto se utilizó los aditamentos de la instalación del cuarto de temperatura constante del Instituto de Geología de la UNAM, el cual esta acondicionado con luces infrarrojas que permiten trabajar en condiciones de oscuridad necesarias para manipular el colorante utilizado en los experimentos.

El dispositivo de corte de las columnas utilizado en los experimentos fue diseñado para evaluaciones realizadas por Duwig, (2008), con el colorante piranina, (Figura VII.42). El aparato

cuenta con una base móvil que se desliza hacia adelante permitiendo colocar el monolito de suelo en la posición deseada para el corte, el corte se realiza con una cuchilla de acero inoxidable. El dispositivo tiene además un soporte para colocar una cámara digital con la cual son obtenidas y preservadas las imágenes.

En la figura VII.42 se muestra el dispositivo de corte, en la imagen se puede distinguir los componentes principales como son: 1) base de la guillotina, 2) soportes de la cuchilla, 3) base de la columna a cortar, 4) cuchilla de acero y 5) mango de la cuchilla.

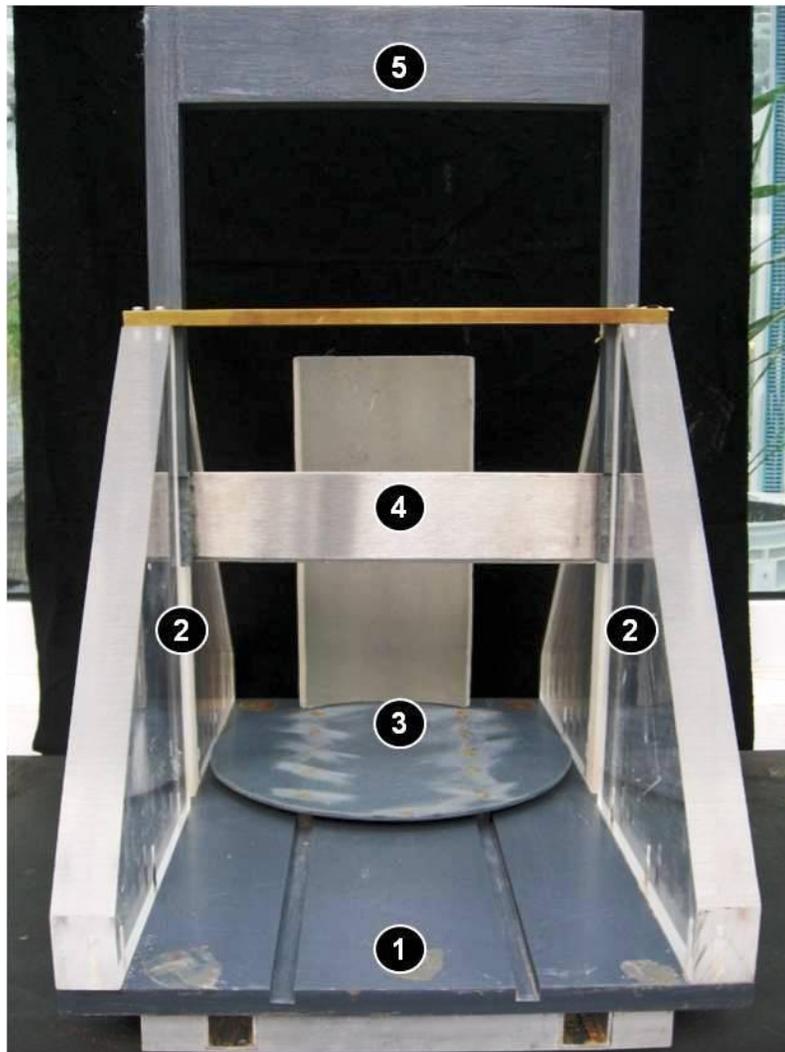


Figura VII.42. Detalle del dispositivo de corte utilizado en el experimento

Se cortaron un total de 6 columnas, el análisis de las rutas de flujo preferencial se realizó aplicando una lámina de agua en la superficie de la columna, es decir una lámina de colorante en solución, simulando con ello el riego por inundación con aguas residuales que reciben en campo los suelos estudiados. Una vez aplicada la lámina de riego, se dejaba reposar la columna durante un tiempo promedio de 30 minutos, para permitir el desplazamiento de la solución de colorante a todo lo largo de la columna.

Se realizaron diferentes cortes en cada columna, a partir de la orilla siguiendo el diámetro, cada intervalo fue similar; Con esto se logró observar que el flujo de colorante es heterogéneo a lo largo y ancho de la columna.

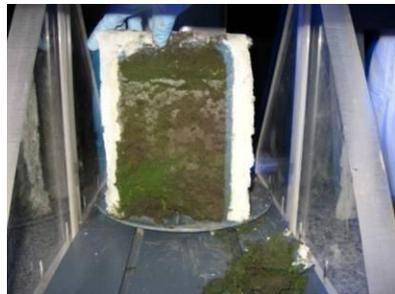
A cada corte se prendió la lámpara de luz negra y se capturaron las imágenes utilizando la cámara en modo sin flash para capturar la fluorescencia emitida del colorante. El procedimiento descrito se muestra en la siguiente secuencia de imágenes (Figura VII.43).



Se realizó el corte descendiendo la cuchilla hasta la base.



Se limpio la base de la columna.



Se acomodo la columna al frente.



Se captura la imagen bajo luz negra.

Figura VII.43. Secuencia de imágenes que muestran el procedimiento de corte de las columnas una vez aplicada la lámina de riego con el colorante fluorescein.

VII.4. Análisis Y Discusión De Los Resultados Fluorescein (Análisis Del Flujo Preferencial De Agua En Columnas De Suelo).

VII.4.1 Variables evaluadas

Para el análisis de rutas de flujo preferencial en columnas de suelo intacto (monolitos) se utilizaron 5 columnas a las cuales se les aplicó diferentes tratamientos de concentración de colorante y tamaño de la lámina de colorante aplicada (Cuadro VII.16). Cada columna fue cortada en rebanadas utilizando el procedimiento antes descrito, en cada tratamiento se adquirieron las imágenes con una cámara Cannon powershot A540 donde los parámetros fueron: representación del color sRGB, sin flash, longitud focal promedio: 7.89 mm, abertura relativa: F/3.2, tiempo de exposición: 1 seg., modo de medición: trama, compensación de exposición: 0-1.33 pasos, se evaluó la calidad de las imágenes de las rutas y la capacidad del colorante para emitir fluorescencia.

Cuadro VII.16. Variables evaluadas en las columnas: tratamientos y periodos de reposo.

Número de columna	Día que se sacó del cuarto frío	Día que se adicionó el colorante	Concentración del colorante	Día que se realizaron los cortes.
0	30-08-2010	Se le adicionó agua		30-08-2010
1	30-08-2010	31-08-2010	Se agregaron 600 ml de colorante (5 gL^{-1}), de 100 en cien	31-08-2010
2	30-08-2010	31-08-2010	Se agregaron 600 ml de colorante (5 gL^{-1}), de 100 en cien	6- 09-2010
3	31 -08-2010	6- 09-2010	Se agregó una lámina de 5 cm de colorante (3 gL^{-1}).	6- 09-2010
4	1-09-2010	7-09-2010	Se agregó una lámina de 2 cm de colorante (2 gL^{-1})	7-09-2010
5	2-09-2010	7-09-2010	Se agregó una lámina de 2 cm de colorante (1 gL^{-1})	7-09-2010

VII.4.2 Resultados:

La primera columna (Columna 0) fue solo de prueba, a la cual solo se le aplicó una carga hídrica consistente de agua sin colorante. El objetivo de la prueba fue evaluar la técnica del corte así como el filo de la cuchilla, por lo consiguiente esta columna no arrojo imágenes que analizar.

VII.4.2.1 Columna 1

La columna 1 se sacó el día 30 de agosto del cuarto frío, se dejó en temperatura constante 1 día y se agregó 600 ml de colorante con una concentración de 5 gL^{-1} , en cantidades de 100 en 100 ml, en esta columna se realizaron cortes a 5, 10 y 15 cm.

La concentración utilizada en esta columna fue la sugerida por los resultados de la evaluación de la degradación tanto en suelo como en solución, los resultados arrojados fueron los siguientes:

Primer corte a 5 cm



Figura VII.44. Detalle del primer corte de la columna 1

En la figura VII.44 se resaltan en color rojo las rutas de flujo preferencial del suelo, cabe mencionar que en amarillo se muestra que no existe el efecto de borde, es decir, no existe la fuga del colorante o flujo del colorante por las paredes con lo cual se reduce el error.

Se muestran tres zonas del corte marcadas con puntos azules, en las cuales no hay colorante. Lo anterior pone de manifiesto que el flujo de agua en la columna no es homogéneo ya que hay arreglos en la estructura del suelo que no permite el flujo continuo del colorante.

La fluorescencia de este primer corte no permite reconocer secciones donde se pueda contemplar detalles de la marca dejada por el paso del colorante ya que aparentemente la concentración es muy intensa, sin embargo en conjunto la fluorescencia es muy buena ya que permite ver detalles como la bifurcación del flujo preferente del colorante.

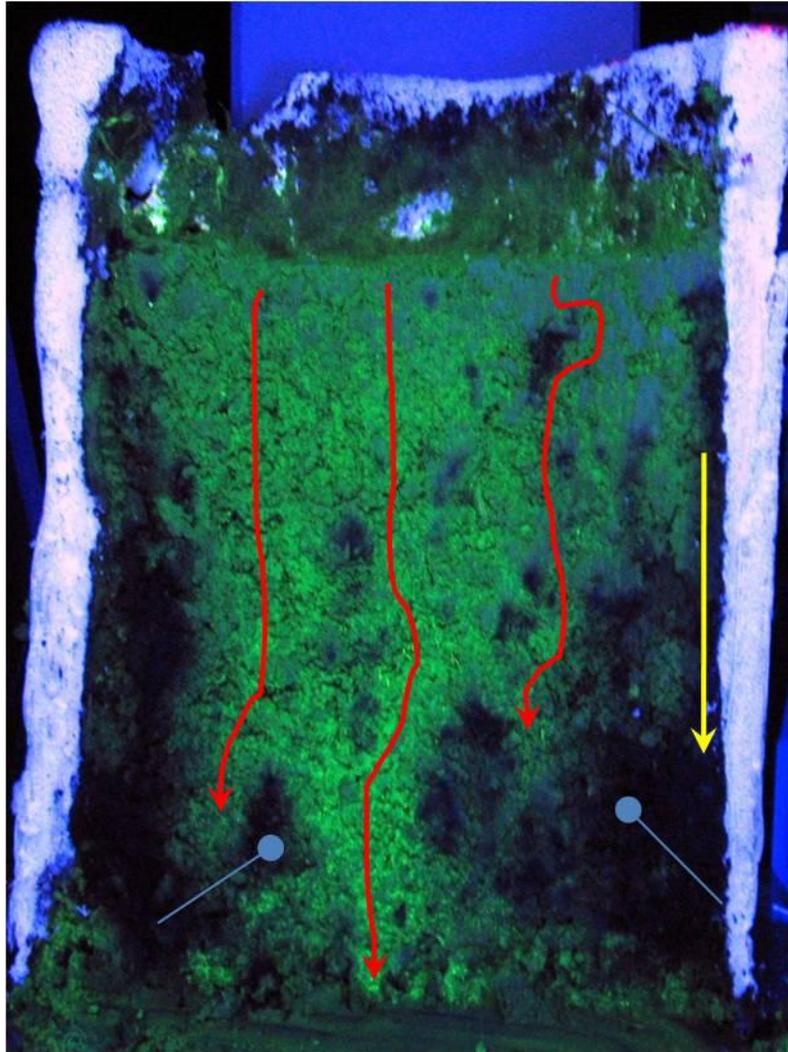


Figura VII.45. Detalle del segundo corte de la columna 1.

Segundo corte a 10 cm

En este corte se puede contemplar que la ruta de flujo preferencial es más uniforme (Figura VII.45), esto se considera que se debe por el acomodo de la estructura del suelo, se presentan solo dos áreas, marcadas con azul, que evocan una forma de embudo al flujo, tal vez este efecto se debe al tiempo que tiene de desplazamiento sin embargo esto no es posible identificarlo debido a que la intensidad de la fluorescencia no permite tonalidades entre las secciones de la columna de forma vertical.

La ruta del flujo en si se guía por un eje central y dos laterales los cuales se disipan hacia la tercera parte de la longitud de la columna tal como lo muestran las flechas en rojo.

Tercer corte a 15 cm



Figura VII.46. Detalle del tercer corte de la columna 1.

En el tercer corte de la columna 1 (figura VII.46), se observa una fuerte similitud con el corte anterior (figura VII.45), existen cuatro puntos marcados en azul, donde el colorante no penetra esto posiblemente causado por el arreglo estructural del suelo.

VII.4.2.2 Columna 2

La columna 2 se sacó del cuarto frío el día 30 de agosto, se dejó a temperatura constante durante un día, el día 31 de agosto se agregó un volumen de 600 ml de colorante en concentración de 5 gL^{-1} . La diferencia entre las columnas 1 y 2 es el tiempo transcurrido entre la aplicación de colorante y el corte (Cuadro VII.16). En la columna 2 se realizaron cortes a 5 10 y 15 cm, 6 días después de la aplicación del colorante, es decir, el día 6 de septiembre.

El objetivo en esta columna fue:

- Evaluar la persistencia del colorante en el suelo (figura VII.47), es decir, que el flujo de colorante fuera visible 6 días después de ser aplicado.

Con base en los resultados observados en el experimento de degradación del colorante en el suelo (capítulo fluorescein degradación), esto era posible, sin embargo había que validarlo.



Figura VII.47. Detalle del corte de la columna 2

El corte realizado en la columna 2 mostrado en la figura VII.47, se nota que la coloración presente en la columna es muy intensa inclusive después de pasados 6 días, esto se hace evidente incluso sin la excitación de la luz UV, la figura VII.47 es un claro ejemplo de esto.

VII.4.2.3 Columna 3

La columna 3 fue sacada del cuarto frío el día 31 de agosto, se dejó en el cuarto de temperatura constante hasta el día 6 de septiembre, este día se agregó una lámina de 5 cm de grosor de colorante con una concentración de 3 gL^{-1} , se realizaron cortes el día 6 de septiembre.

Los objetivos de esta columna eran:

- Evaluar una concentración menor de colorante dadas las observaciones de la columna 1 (en algunas de las rutas de flujo preferencial no fue óptima la distinción entre las tonalidades). La concentración probada fue de 3 gL^{-1} .
- Evaluar el efecto del secado del suelo de la columna en la formación de flujos preferenciales debido al agrietamiento del suelo dado su alto contenido de arcillas (alrededor de 30%).

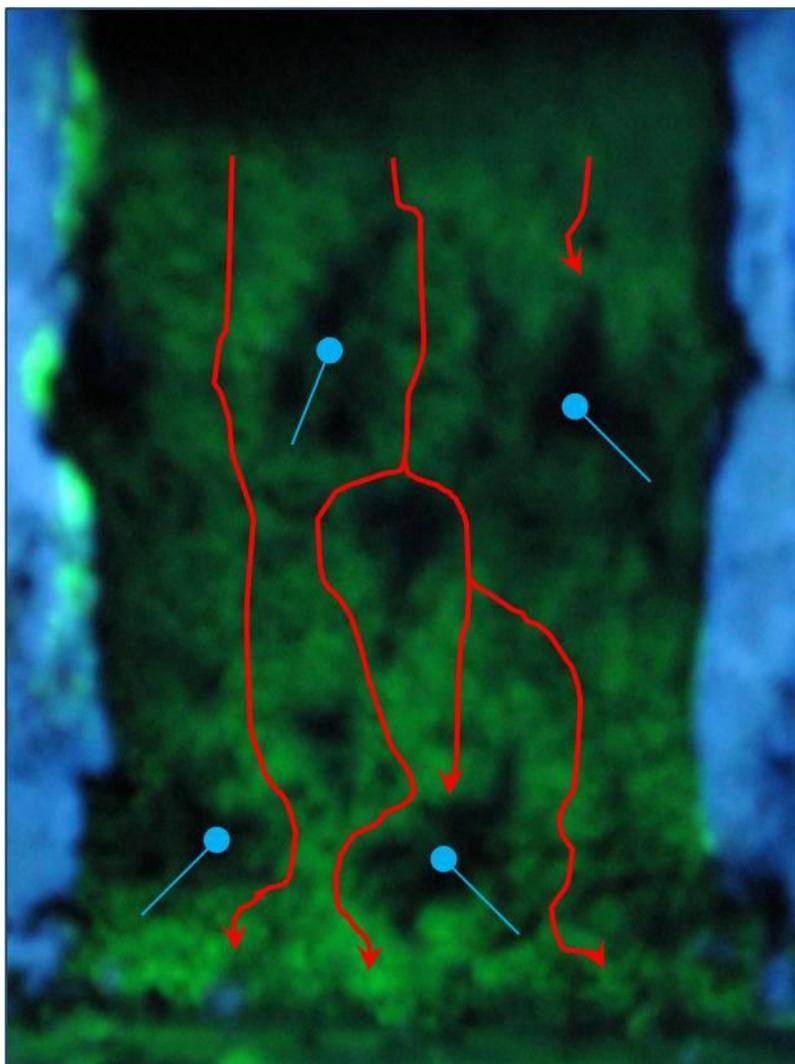


Figura VII.48. Detalle del corte de la columna 3

El detalle del corte de la columna 3 (figura VII.48) se cuantificó 4 obstáculos, estos desviaron el flujo homogéneo del colorante a través de la columna, la coloración se mantuvo constante, presentando coloración difuminada (desvanecida), con lo cual indica que no hay circulación debido a la estructura del suelo, bloqueando parcialmente la ruta del flujo preferencial.

La intensidad del colorante se muestra muy intensa dando muy pocas tonalidades entre las zonas clave, como son las zonas coloreadas y sin coloración.

VII.4.2.4 Columna 4

La columna 4 se sacó del cuarto de temperatura fría el día 1 de septiembre se dejó en el cuarto de temperatura constante hasta el día 7 de septiembre, posteriormente se agregó una lámina de colorante de 2 cm de grosor con una concentración de 2 gL^{-1} , se realizaron los cortes de la columna el mismo día.

Para esta columna se propuso como objetivos:

- Reducir el grosor de la lámina de riego de 5 cm a solo 2 cm.
- Bajar la concentración del colorante de 3 gL^{-1} a 2 gL^{-1} .



Figura VII.49. Detalle del corte de la columna 4.

En la columna 3 se manifestó como principal situación una alta intensidad en la coloración, por lo cual para esta columna se propuso reducir otro gramo el colorante, finalmente se propuso reducir a 2 cm de grosor la lámina de riego.

La figura VII.49 muestra el detalle del corte de la columna describiendo cuatro puntos de obstaculización a las rutas de flujo preferencial, entre la flecha roja de la izquierda y la central se muestra una zona donde indica que la coloración es muy baja con lo cual nos da un detalle más descriptivo de la influencia ejercida por la estructura del suelo sobre las rutas de flujo preferencial.

VII.4.2.5 Columna 5

La quinta columna se sacó del cuatro de temperatura fría el día 2 de septiembre se dejó hasta el 7 de septiembre a temperatura constante, se agregó una lámina de colorante con un grosor de 2 cm y una concentración de 2 gL^{-1} , se realizaron cortes el mismo día.

El objetivo de esta columna fue:

- complementar los resultados obtenidos en la columna 4.

- Reducir la concentración del colorante a 1 gL^{-1} , considerando la posible influencia de este cambio sobre la imagen obtenida y su descripción gráfica sobre las rutas de flujo preferencial.

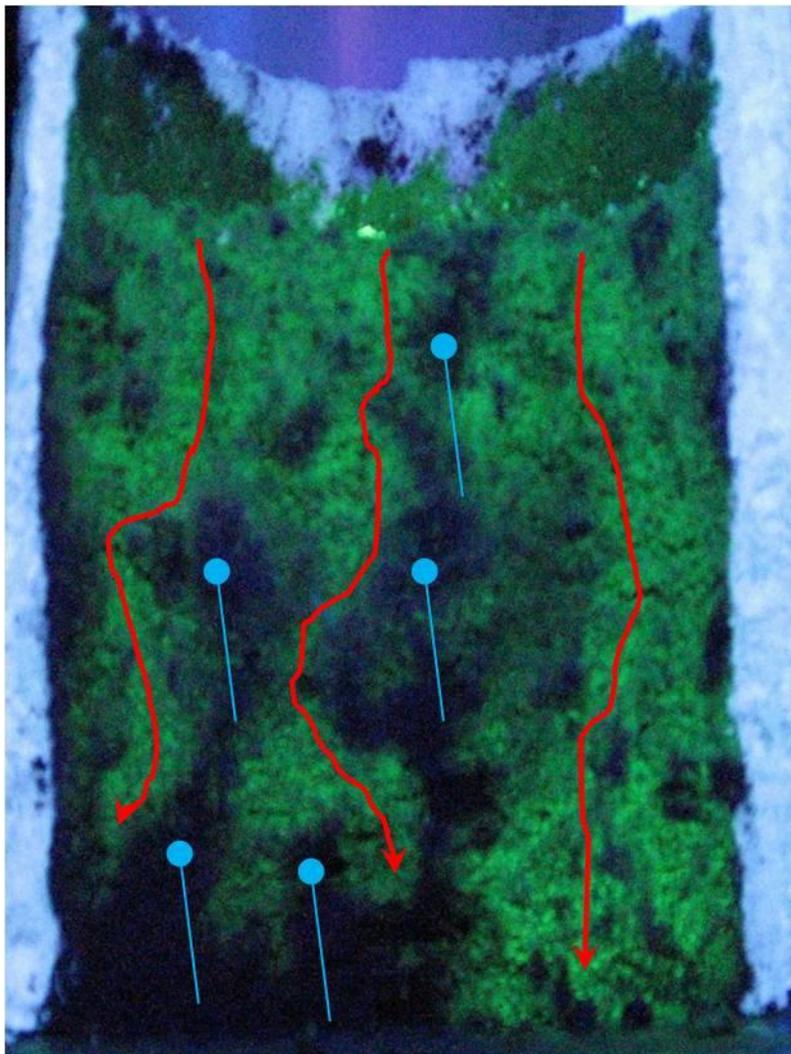


Figura VII.50. Detalle del corte de la columna 5.

La columna 5, cuyo corte se presenta en la figura VII.50, muestra 5 zonas donde la coloración no se presenta ya que influye directamente sobre la ruta de flujo preferencial.

El resultado de este corte (figura VII.50) es muy trascendente ya que se muestra una coloración más dependiente del arreglo estructural del suelo, no se percibe una influencia de filtración o de difusión del color, por el contrario se ven más marcadas las zonas donde la fluorescencia es más intensa y en otras es más tenue.

En base a los datos descriptivos como es la intensidad de la coloración, la definición del delineado de las rutas de flujo preferencial de agua seguidas por el colorante presente en las columnas 4 y 5, se determina que:

El fluorescein es un colorante muy capaz de trazar rutas de flujo preferencial del agua en columnas de suelo intacto, ya que presenta una buena fluorescencia al realizar cortes en columnas de suelo intacto tratadas con láminas de riego conteniendo este colorante.

VIII. CONCLUSIONES

Piranina

El colorante piranina presenta una gran dificultad para ser cuantificado en el tipo de suelo Phaeozem, ya que este libera material edáfico o posible materia orgánica al medio acuoso durante el procedimiento de extracción originando falsos positivos.

El empleo de medios físicos así como la reducción de tiempo en contacto para retener el material edáfico, auxiliaron considerablemente a reducir la interferencia causada.

No se logró proponer una metodología para evaluar la sorción del colorante en el suelo, ya que no se obtuvieron resultados que sustenten una lectura de la concentración igual o menor a la aplicada; sin embargo para darle continuidad al proyecto se sugiere, aumentar la cantidad de colorante aplicado al suelo.

El colorante piranina ya fue utilizado como trazador de rutas de flujo preferencial de agua previamente en suelos de otra localidad en el país, sin embargo para su aplicación en suelo del Valle del Mezquital no es recomendable su uso ya que sería necesario altos gramajes encareciendo los costos de la investigación.

Fluorescein

El colorante fluorescein tiene un tiempo de viabilidad a 20 °C de 6 días en contacto con suelo de tipo Phaeozem a una concentración de 1 y 5 gL⁻¹, así mismo de 4 días con una concentración de 10 gL⁻¹, la viabilidad se puede prolongar si el colorante se reserva a una temperatura menor a 5 °C.

El fluorescein en solución acuosa tiene un periodo de viabilidad superior a 6 días cuando su concentración es 1, 5 y 10 gL⁻¹, esto si se mantiene la solución a una temperatura menor a 5 °C, sin embargo su viabilidad es reducida si las soluciones se mantienen a una temperatura de 20 °C.

La solución con una concentración de 5 gL⁻¹ de colorante fluorescein se mantiene más estable tanto a 20° C como a una temperatura menor de 5 °C, teniendo la oportunidad de realizar evaluaciones sin perder detalle por un lapso prolongado de días.

El fluorescein fue seleccionado como trazador de rutas de flujo preferencial en columnas de suelo intacto, ya que permite ver en imágenes fluorescentes los caminos que toma el flujo del colorante en solución acuosa, dando una descripción de su arreglo estructural a nivel de macroporosidad.

Los parámetros propicios así como el procedimiento, para tener imágenes de las rutas de flujo preferencial del agua en columnas de suelo intacto cuyas dimensiones sean 20 cm de diámetro y 35 cm de altura conservadas en espuma de poliuretano se propone a continuación.

Dejar a temperatura ambiente la columna a tratar por un lapso de 7 días, terminado este tiempo se prepara una solución de colorante-agua cuya concentración sea de 1 a 2 gL⁻¹, posteriormente, se aplica una lámina de riego de 2 cm, que corresponde en proporción a la aplicada en el rancho de Las Palmas, en Tlahuelilpan, sitio del cual se colectaron las columnas. Consecutivamente, permitir un reposo de 30 minutos después de aplicado el colorante. Finalmente para evitar el efecto de difusión del colorante, se debe realizar el corte de la columna el mismo día de la aplicación,

Para columnas con otras dimensiones, el volumen a preparar de solución de colorante depende del grosor de la lámina de riego a aplicar, además, es elemental que el grosor tenga una relación de escala con respecto a la lámina de riego o carga hídrica aplicada en la parcela de cultivo o sitio en el cual se extraigan las columnas, la concentración final ($1-2 \text{ gL}^{-1}$) depende de los resultados obtenidos, en estos se debe definir correctamente y de forma natural la ruta que el agua recorre a lo largo de la columna sin difuminarse, se sugiere hacer 1 prueba inicial con 1 gL^{-1} .

La información generada en el trabajo de tesis permitirá el buen desarrollo de dos proyectos de investigación en el área de transporte de solutos y física de suelos del Departamento de Edafología del Instituto de Geología.

IX. REFERENCIAS

- Amoozegar** A. and Wilson GV. 1999. Methods for measuring hydraulic conductivity and drainable porosity. En Skaggs RW, van Shilfgaarde J, (Eds.). *Agricultural Drainage*. Madison, Wisconsin, USA. pp. 1149-1205.
- Andreini**, M.S. and Steenhuis, T.S., 1990. Preferential paths of flow under conventional and conservation tillage. *Geoderma*. 46, 85-102.
- Andrews**, R.E. Jr., Johnson, W.S., Guard, A.R., Marvin, J.D., 2004. Survival of enterococci and Tn916-like conjugative transposons in soil. *Can. J. Microbiol.* 50,957-966.
- Bear**, J. 1972. *Dynamics of fluids in porous media*. Dover Publications, Inc. New York, USA. 764 p.
- Bejat**, L., Perfect, E., Quisenberry, V.L., Coyne, M.S. and Haszler, G.R., 2000. Solute transport as related to soil structure in unsaturated intact soil blocks. *Soil Science Society of America Journal*. 64, 818-826.
- BGS** and CNA, 1995. Effects of wastewater reuse on groundwater in the Mezquital Valley, Hidalgo State, Mexico. Phase 1 Report – February 1995. BGS Technical Report WD/95/24.
- Bravo-** Hollis, Helia. 1978. Las cactáceas de México. Vol. I. UNAM. México. p. 89-102
- Chemicalbook**, 2010, CAS: 6358-69-6 *Pyranine*. Disponible en: http://chemicalbook.com/CAS_6358-69-6.htm revisado el 02-03-10
- Chemicalland21**, 2010a. *Fluorescein sodium*. Disponible en: <http://chemicalland21.com/specialtychem/finechem/FLUORESCIN%20SODIUM.htm>
- Chemicalland21**, 2010b, *Pyranine*. Disponible en: <http://chemicalland21.com/lifescience/foco/PYRANINE.htm>
- CONAGUA**. 2007. Capítulo: Potabilización, desinfección y tratamiento de agua. Situación del Subsector Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Edición 2007.
- Contreras** Arias, A. 1955 Definición de las zonas áridas y su delimitación en el territorio Mexicano. Instituto Mexicano de Recursos Naturales Renovables, 3-24
- Crescimanno** G, de Santis A, Provenzano G., 2007. Soil structure and bypass flow processes in a Vertisol under sprinkler and drip irrigation. *Geoderma*. 138: 110–118.
- Custodio**, E, Llamas. M.R., 1975. *Hidrología subterránea*. Tomo II. Ed. Omega. Barcelona, España. pp. 1196-1209.
- Díaz** E, Duarte O, Cerana J, Fontanini P., 2003. Ajuste metodológico en la medición de la conductividad hidráulica saturada “*in situ*” en suelos Vertisoles y Entisoles de la república Argentina mediante el permeámetro de Guelph. *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo*. 6: 153-158.
- Duwig**, C, Delmas P, Müller K, Prado B, Ren K, Morin H, Woodward A. 2008. Quantifying Fluorescent Tracer Distributions In Allophonic Soils To Image Solute Transport. *In European Journal of Soil Science* 59: 94–102. DOI: 10.1111/j.1365-2389.2007.00970.x.

- Edwards**, W.M., Shipitalo, M.J. and Dick, W.A. 1992. Rainfall intensity affects transport of water and chemicals through macropores in no-till soil. *Soil Science Society of America Journal*. 56, 52-58.
- González-Quintero** L. 1968. Los tipos de vegetación del Valle del Mezquital, Hgo. Departamento de prehistoria, I.N.A.H. México. 53 pp.
- Gutiérrez** Ruiz, M. E., Siebe C. and Sommer, I. 1996. Effects of land application of wastewater from Mexico City on soil fertility and heavy metal accumulation: A bibliographical review. *Environmental Reviews*. 3, 318-330.
- INEGI**, 1981, Atlas Nacional del medio físico., 1ª. Edición. Cartas edafológicas pág. 164. Cartas de uso de suelo pág. 182. Escala 1: 1, 000, 000. Elaborada en base a fotos aéreas de 1973 a 1974
- IPC**, 2009. *Informe De Práctica De Campo*, Curso De Monitoreo Ambiental, Instituto De Geología, UNAM, México.
- Jarvis**, N., 1998. Modeling the impact of preferential flow on nonpoint source pollution. En Selim HM, Ma L (Eds.). *Physical Nonequilibrium in Soils: Modelling and Application*. Chelsea, Michigan, USA. pp. 311-347.
- Jarvis**, N.J. 2007. A review of non-equilibrium water flow and solute transport in soil macropores: principles, controlling factors, and consequences for water quality. *European Journal of Soil Science*. 58, 523-546.
- Jiménez** C. B. and Landa V. H., 1998. Physic-chemical and bacteriological characterization of wastewater from Mexico City. *Water Science and Technology*. **37**(1), 1-8.
- Jiménez-Cisneros**, B. 1995. Wastewater reuse to increase soil productivity. *Water Science and Technology*. **32**, 173–180.
- Mayagoitia**, D. H. 1959. Estudio físico y químico de algunos suelos del Valle del Mezquital. *Act. Politécnica Mexicana*, 1:291-300.
- Müller**, K., Duwig C., 2007. The transport and sorption of 2, 4-D in allophanic soils. *Soil Sci*. 72, 333-348.
- Perret**, J., Prasher, S.O., Kantzas, A., Hamilton, K. and Langford, C. 2000. Preferential solute flow in intact soil columns measured by SPECT Scanning. *Soil Science Society of America Journal*. 64, 469-477.
- Poletika**, N.N. and Jury, W.A., 1994. Effects of soil management on water flow distribution and solute dispersion. *Soil Science Society of America Journal*. 58, 999-1006.
- Prado** B. 2006. Étude du mouvement de l'eau et du transfert réactif du nitrate dans les sols volcaniques du bassin versant élémentaire de la Loma, Mexique. Université Joseph Fourier, Grenoble, Francia. Tesis Doctoral.
- Prado**, B., Duwig, C., Márquez, J., Delmas, P., Morales, P., Etchevers, J.D. 2008b. Image Processing-based study of soil porosity and its effect on water movement through Andosol intact columns. Enviado a la revista: *Agricultural Water Management*.

- Quinsenberry**, V.L., Phillips, R.E. and Zeleznik, J.M., 1994. Spatial distribution of water and chloride macropore flow in a well structured soil. *Soil Science Society of America Journal*. 58, 1294-1300.
- Raisz**, E. 1959, Landforms of México, Mapa preparado por Geography Branch of the office of Naval Research.
- Raschid-Sally**, L. and Jayakody, P. 2008. Drivers and characteristics of wastewater agriculture in developing countries-results from a global assessment. International Water Management Institute Research Report 127, IWMI Colombo Sri Lanka, 38pp.
- Raymundo**, E., 2008, *Parámetros De Transporte De Atrazina En Un Andosol Y Un Vertisol De México*. Tesis D en C, Colegio De Postgraduados, Montecillo, Texcoco, Estado De México.
- Segerstrom**, K. 1962. Geology of the south central Hidalgo and northeastern México, U. S. Geol. Survey Bull. No. 1104-C; 87- 162.
- Shipitalo**, M.J., Edwards, W.M., Dick, W.A. and Owens, L.B., 1990. Initial storms effects of macropore transport of surface applied chemicals in no-till soil. *Soil Science Society of America Journal*. 54(6), 1530-1536.
- Siebe**, C. 1998. Nutrient inputs to soils and their uptake by alfalfa through long-term irrigation with untreated sewage effluent in Mexico. *Soil Use Manage.* 14, 119–122.
- Siebe**, C. and Cifuentes, E. 1995. Environmental impact of wastewater irrigation in Central Mexico an overview. *International journal of Environmental Health Research*. 5, 161-173.
- Siebe**, Ch. & W.R. Fischer. 1996. Adsorption of Pb, Cd, Cu and Zn by two soils of volcanic origin under long term irrigation with untreated sewage effluent in Central Mexico. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 159, 357-364.
- Sparks**, DL., 1995. *Environmental soil chemistry*. Publ. Academic Press, USA, 267 p.
- Strock**, J.S., Cassel, D.K. and Gumpertz, M.L., 2001. Spatial variability of water and bromide transport through variably saturated soil blocks. *Soil Science Society of America Journal*. 65, 1607-1617.