



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES IZTACALA

“ESTRUCTURA TRÓFICA DE LA COMUNIDAD DE NEMÁTODOS DE VIDA LIBRE DE UN SUELO CONTAMINADO POR COMBUSTÓLEO DE JALACINGO VER.”

TESIS

QUE PARA OBTNER EL TÍTULO DE

BIÓLOGO

PRESENTA

ABBID HERNÁNDEZ CHIMAL

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. SALVADOR RODRÍGUEZ ZARAGOZA

LOS REYES IZTACALA, EDO DE MÉXICO, 2010.



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.

DEDICATORIAS

A Dios por permitirme llegar hasta estas instancias y ver la luz de este nuevo día.

A mis padres Verónica y Sergio por darme la vida y siempre estar al pendiente de mis estudios y sobre todo por el apoyo y la confianza que me dieron a lo largo de toda la carrera, ahora me toca agradecerles ese gran esfuerzo y sacrificio y decir con gusto que aquí está un pequeño paso pero el más importante en lo que va de mi vida.

A mis hermanas Anahí e Irais (las gemelas) por compartir gran parte de mi vida y tener gratos recuerdos durante nuestra niñez, así como a mis sobrinitas Yamilet y Yatziry que las quiero mucho.

A la banda micro que de micro no tiene nada excepto el nombre, de verdad es un placer estar en este laboratorio sobre todo por la libertad que se tiene para hacer las cosas y la gran confianza que se deposita en c/u de nosotros, además de que son muy buenos compañeros y amigos por eso les agradezco a: **Salvador, Ramón, Víctor,** Sandra, Angélica, Isabel, Laurita, Candys, Luisa, Ana, Miguel, Horacio, Chucho, Erick, Cruz, Jaime, Daniel, Erika, Samantha, Anahí, Jorge, Ximena y Vania.

A mis amigos de la carrera Roberto, Manuel, Diego, Saúl (los briologos) con los que he pasado momentos inolvidables, a Araceli una amiga incondicional, a Miguel un amigo que siempre me ha brindado su apoyo, asimismo a Kenya, Gaby, Caro, Ángela, Angélica, Lulú, las 2 Nan, Per... y sé que la lista continua pero saben que están aquí todos, simplemente gracias por compartir los mejores momentos de la carrera.

A la banda de atletismo comenzando por Flavio y a todos sus discípulos por hacer tan ameno los entrenamientos y compartir experiencias en la pista. Además que este deporte es una de mis pasiones no solo porque me ayuda a mantener mi salud

sino también porque me enseña que en la vida hay metas que debemos cumplirlas y solo se logran con disciplina y constancia, además de que me ayuda a relajarme y buscar mejores soluciones a mis problemas, sin duda que sin el atletismo sería una persona distinta.

AGRADECIMIENTOS

A la UNAM y a la Fes-Iztacala en primer lugar, porque me han hecho como persona y profesional capaz y responsable, además de haber aportado tanto conocimiento a mi vida.

Al profe Salvador por aceptarme en el laboratorio, así como su gran apoyo y confianza, también me permito agradecerle por las enseñanzas en sus pláticas tan amenas y tan interesantes y por su fascinación por la ciencia ya que varias frases como la de “Lo único constante en la naturaleza es que nada es constante”, “Bajo qué condiciones se da tal proceso” la de “No somos machos pero somos muchos” o la de “Más que humanizar la naturaleza, hay que naturalizar a la humanidad”; de verdad que son frases que las tengo bien presentes y que sin duda al abordar cualquier tema de biología las considero mucho.

Al profe Ramón porque también me ha ayudado a resolver dudas además de ser buenos rivales en las retas de básquet.

A Sandra, Candys y Angélica que siempre estuvieron al pendiente de mi tesis y fueron un gran apoyo para la realización de la misma.

A Isa porque a pesar del poco tiempo de conocernos hemos compartidos momentos maravillosos.

Por último a mis sinodales:

M. en C. María de los Ángeles Sanabria Espinoza

Dr. Daniel Muñoz Iniestra

Dr. Víctor Manuel Rivera Aguilar

M. en C. Francisco López Galindo

MUNDO SUELO

Suelo, el asombro por ti ha desaparecido sin saber que en última instancia

Nuestra vida humana depende de ti.

Entre tus entrañas escondes nuestro pasado envolviéndolo bajo el velo de la verdad.

Suelo, representas la fertilidad de nuestro planeta porque entre tu vientre brota la vida.

Tú eres sabio ya que serpenteas bajo nuestros pies secuestrando raíces para alimentar a

tus hijos que a su paso caminan sobre tu cabeza.

Eres el puente de vida entre el agua y la tierra y de la tierra al aire, eres testigo de la

evolución ¡suelo, los años te han forjado!

Humanos que tanto nos aferramos a nuestra vida,

Sin saber que inevitablemente al paso de nuestra muerte

El suelo nos atraerá como un imán hacia él,

Convirtiéndonos en pequeñas partículas de polvo

Que al paso del tiempo, el viento podrá esparcir sobre la faz de la Tierra

Llevándose consigo sólo los recuerdos de nuestra existencia.

ABBID

ÍNDICE

RESUMEN	1
INTRODUCCION	2
PREGUNTA	9
ANTECEDENTES	9
HIPÓTESIS	10
OBJETIVO GENERAL	10
OBJETIVOS PARTICULARES	10
ÁREA DE ESTUDIO	11
MATERIAL Y MÉTODOS	13
RESULTADOS	16
DISCUSIÓN	26
CONCLUSIÓN	34
APÉNDICE 1	35
APÉNDICE 2	38
BIBLIOGRAFÍA	63

RESUMEN

Los nemátodos del suelo son los metazoos más abundantes del edafón y juegan un papel muy importante, debido a que ellos actúan como consumidores secundarios e intermediarios ocupando posiciones clave dentro de la red trófica del suelo. Los nemátodos se organizan en grupos tróficos (fitófagos, fungívoros, bacterívoros, depredadores y omnívoros) y la estructura de la comunidad ofrece un eficiente instrumento a los investigadores para la evaluación biológica de la calidad y el funcionamiento del suelo, sobre todo en lugares que han sido contaminados por hidrocarburos derivados del petróleo, como es el caso del combustóleo; que se encuentra dentro de la lista de emergencias ambientales dictada por la PROFEPA.

En este estudio, se comparó la estructura trófica de la comunidad de nemátodos de vida libre presentes en un suelo de cultivo contaminado con combustóleo (SC), con la existente en un suelo no contaminado (SNC); considerando la zona de raíces en ambos suelos.

Los resultados mostraron que tanto la abundancia como la riqueza fueron mayores en el SC, en ambos suelos se encontraron los 5 grupos tróficos principales de nemátodos, además la presencia de las raíces reflejó tener gran importancia para los nemátodos en el SC. Por otra parte, algunos índices como el de la relación Fungívoros / Bacterívoros (FF/B), indicó que la vía de descomposición en el SC es llevada a cabo por las bacterias, mientras que en el SNC se realiza a través de los hongos, asimismo la baja abundancia de ciertos grupos como los depredadores y omnívoros evidenciaron que existe una perturbación tanto en el SC como en el SNC, el primero debido a la presencia del combustóleo y el segundo probablemente se deba a las prácticas agrícolas que se llevan a cabo en la parcela. Lo anterior se confirmó a través del índice de madurez (IM), que en ambos suelos tuvieron valores cercanos a 2, siendo éste un valor que indica un estado de perturbación considerable.

INTRODUCCIÓN

EL SUELO

El suelo se puede definir como una matriz principalmente de arenas, limos y arcillas que contiene materia viva (biomasa), materia muerta (necromasa) con cantidades variables de líquidos y gases. Asimismo, el suelo se complementa con las interacciones geológicas, hidrológicas, atmosféricas y biológicas, permitiendo la unión de todas ellas en la zona llamada esfera edafológica (Coleman *et al.*, 2004) (Fig.1).

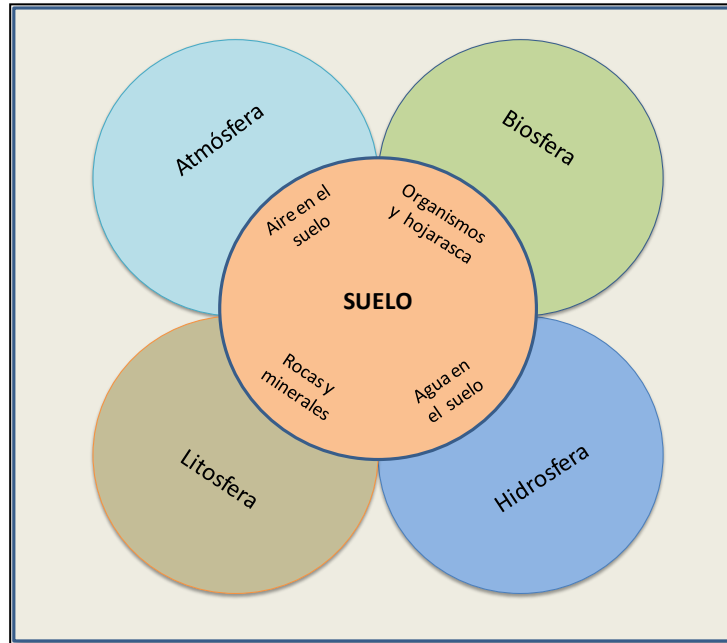


Fig.1. El suelo, mostrando interacciones de factores bióticos y abióticos (from Fitz Patrick, 1984).

La distribución heterogénea de los componentes dentro de la esfera edafológica proporciona una gran variedad de condiciones ambientales en todos los niveles, desde las grandes escalas como las de paisaje, hasta escalas pequeñas como la de los microporos, contribuyendo de esta manera, hacia una naturaleza variada

del hábitat del suelo y de esta forma determinando la composición y la actividad biológica en un sitio y tiempo en particular (Killham, 1994).

LA RIZÓSFERA

Al considerar el suelo, tenemos que incluir a una zona esencial llamada rizósfera, que es la parte donde las raíces de las plantas, el sustrato edáfico y la biota interactúan entre sí (Lynch *et al.*, 2002) (Fig. 2). En relación a esto, la mayor parte del suelo ha sido influenciada por las raíces de las plantas en un momento u otro, y por tanto, la mayor parte del suelo sería o habría sido en algún momento considerado como rizósfera (Cardon and Whitbeck, 2007).

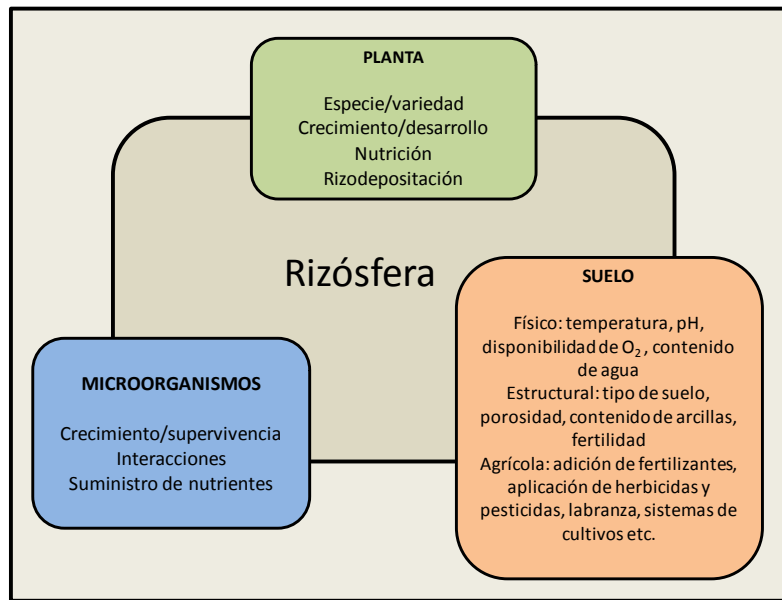


Fig. 2. Factores que influyen en las interacciones de la rizósfera.

Sin embargo, aquí el término rizósfera se centra únicamente en el suelo que está en relación actual con las raíces vivas de las plantas. Sin embargo, el hecho de que una gran proporción de la superficie del suelo fue directamente impactada por las raíces de las plantas y la biota asociada del año pasado, de hace 10 años, o de hace 100 años; proporciona un contexto que puede ser muy valioso para discutir sobre la presencia de las comunidades de microorganismos y los procesos ecológicos en general (Cardon and Whitbeck, 2007).

En este sentido la extensión física de la zona activa de la rizósfera es difícil de definir, pero en cualquier momento se espera que se extienda unos pocos mm de la superficie de las raíces y se diferencie en base a la actividad biológica del edafón (Hawkes, en Cardon and Whitbeck, 2007).

LA BIOTA DEL SUELO

La actividad biológica en el suelo es muy importante, ya que incluyen la descomposición de la materia orgánica, la mineralización de los nutrientes (haciéndolos biodisponibles) y la degradación de tóxicos; asimismo los organismos que conforman la biota del suelo interaccionan entre sí para obtener nutrientes y energía (Bongers *et al*, 1999).

Estas interacciones bióticas que existen en el suelo, generalmente son más comunes en la rizósfera que en el suelo no rizósferico (Hawkes, en Cardon and Whitbeck, 2007). Algunas interacciones que se pueden distinguir son la de las raíces con hongos micorrízicos y con patógenos, raíz-bacterias, raíz-nemátodos y en general interacciones entre microflora, microfauna, mesofauna, macrofauna y megafauna. Este tipo de interacciones muestran el intercambio y la transformación de monedas biológicas universales tales como las fuentes de carbono orgánico y nutrientes minerales, además determinan las vías del flujo de la energía y la forma que adquiere la estructura de las comunidades, siendo esto representado en lo que se conoce como la red trófica del suelo (Cardon and Whitbeck, 2007) (Fig. 4).

Lo anterior es muy importante para mantener la diversidad del edafón (Hawkes, en Cardon and Whitbeck, 2007). Por ello, el conocimiento de la estructura y función de la red trófica es necesaria para la conservación del suelo (Ferris *et al.*, 2001).

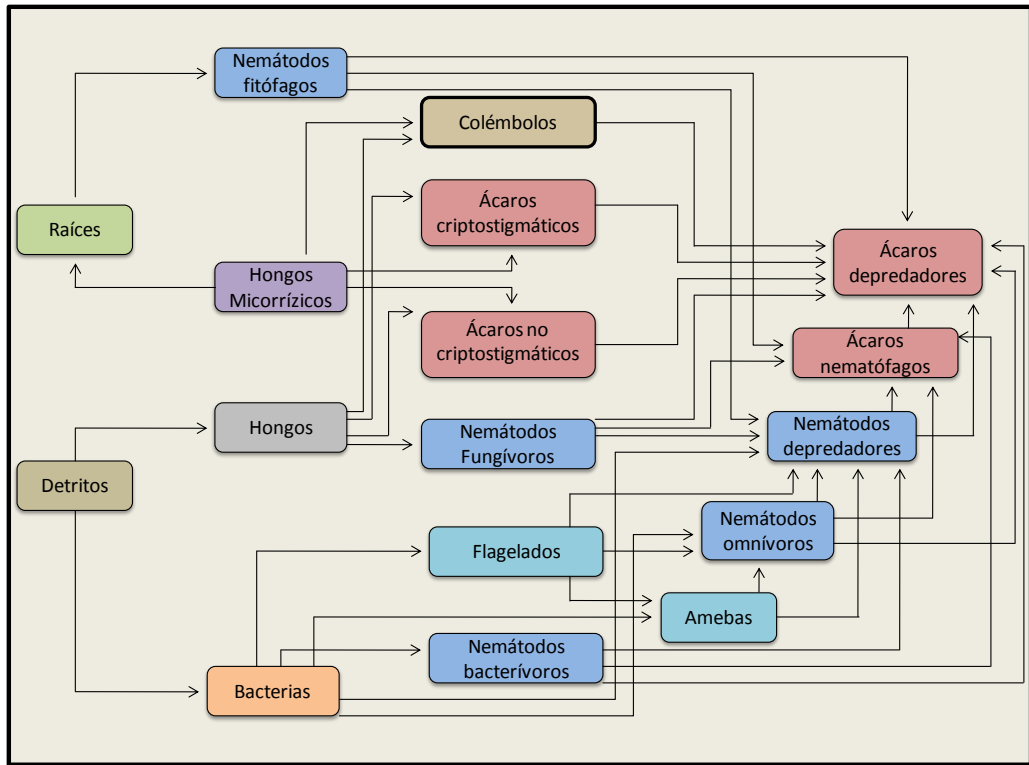


Fig. 4. Estructura de la red trófica del suelo (Adaptado desde de Ruiter *et al.*1995).

CONTAMINACIÓN POR COMBUSTÓLEO

A pesar de la gran importancia que representa el suelo para los ecosistemas terrestres debido a sus funciones clave en la fertilidad, procesos de descomposición y el flujo de la materia y energía; en la actualidad se ve seriamente amenazado principalmente por la contaminación física y química. El factor físico principal es la radioactividad pero otros factores como el impacto mecánico debido a la labranza o por las máquinas agrícolas también está implicado, causando de esta forma; la pérdida de horizontes o la compactación, haciéndolo más susceptible a la erosión física. Por otra parte, los contaminantes químicos en el suelo están divididos en 2 categorías: los macrocontaminantes y los microcontaminantes. Los primeros son moléculas naturales que están presentes temporalmente en el ambiente a una concentración mayor a la normal por ej. los ácidos transportados por la lluvia ácida los cuales cambian el pH del suelo. Por otro lado, los microcontaminantes que son moléculas naturales o

antropogénicas que modifican la naturaleza de algunas reacciones químicas de la biota, son tóxicos a bajas concentraciones y muchas veces tienen efectos permanentes en el ambiente, entre ellos se encuentran los metales pesados, productos agroquímicos, hidrocarburos derivados del petróleo, etcétera (Tarradellas *et al.*, 1997). Los hidrocarburos se han convertido en un problema que se ha extendido como resultado de derrames de contenedores, rupturas en tuberías subterráneas y por varios procesos industriales (Leahy and Colwell 1990, O' Rourke and Connelly, 2003; en Sangabriel *et al.*, 2006) (Fig.5).

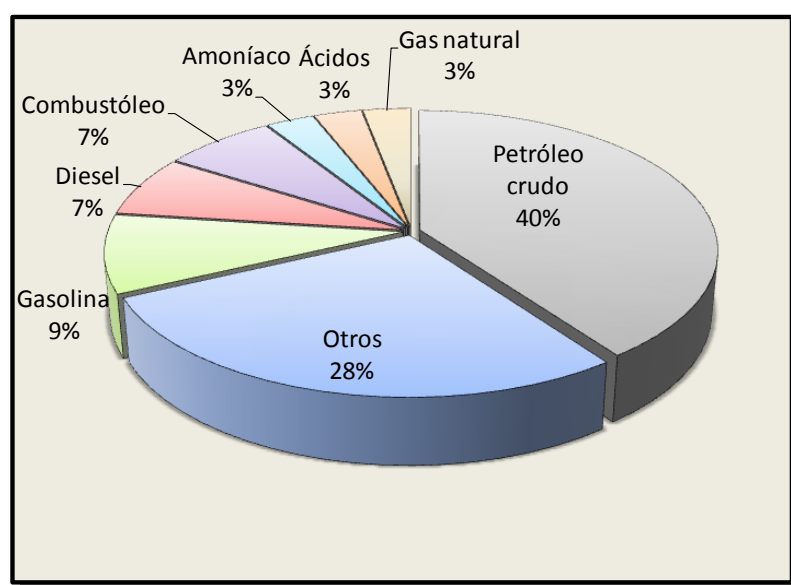


Fig. 5. Principales sustancias involucradas en emergencias ambientales reportadas a la PROFEPA entre 1997 y 1999.

Uno de los hidrocarburos que potencialmente pueden llegar a contaminar el suelo por accidentes ocurridos durante la conducción y el transporte, es el combustóleo, conocido también como “fuel oil” No. 6 (Anderson *et al.* 1993, Bregnard *et al.*, 1996, Saval 1997, Zavala-Cruz *et al.*, 2005; en Sangabriel *et al.*, 2006). Este combustible está constituido por una mezcla compleja y variable de alcanos, alquenos, cicloalcanos e hidrocarburos aromáticos, además contienen trazas de compuestos que contienen azufre y nitrógeno (Philip *et al.*, 1984; en Sangabriel *et al.*, 2006). El efecto negativo que produce este tipo de contaminación es por contacto directo en las plantas, provocando la desintegración de las membranas

celulares y la muerte de las mismas, además de que provoca clorosis e inhibe la germinación de las semillas (Baker 1970, Prado *et al.*, 1999; en Sangabriel *et al.*, 2006). De igual forma afecta las propiedades fisicoquímicas aumentando el contenido de materia orgánica, carbono total y nitrógeno, esto en comparación con suelos no contaminados (Martínez and López, 2001). Asimismo la hidrofobicidad de los hidrocarburos afecta de manera negativa la permeabilidad del agua en el suelo y el intercambio gaseoso (Tarradellas *et al.*, 1997), de igual forma; estos hidrocarburos permiten mayor absorción de la radiación solar debido al color oscuro que poseen y subsecuentemente se ve reflejado en un aumento en la temperatura del suelo.

Este tipo de contaminación afecta la estructura y la función de la red trófica y los resultados de tales perturbaciones son impredecibles debido a que son influenciadas por la heterogeneidad del suelo, las fluctuaciones en las condiciones abióticas, la capacidad de amortiguamiento físico, químico y por las interacciones entre todas éstas (Bongers *et al.* 1999).

No obstante, en el suelo existen organismos como las bacterias y los hongos capaces de degradar hidrocarburos, las primeras pueden utilizar PAHs de 4 anillos como fuente directa de energía y los hongos pueden descomponer compuestos de 4 anillos en presencia de otras fuentes de carbono (Davis *et al.*, 1993; Gramss *et al.*, 1999; en Blakely, 2002). Generalmente, solo los hongos son capaces de degradar PAHs de 5 anillos, pero las bacterias son las más importantes debido a que ellas son más abundantes en el suelo (Canet *et al.*, 2001; en Blakely, 2002). Debido a esto, se ha observado mayor actividad microbiológica en suelos impregnados con hidrocarburos que en suelos libres del mismo (Dobson and Wilson, 1964; en Martínez and López, 2001).

NEMÁTODOS DEL SUELO

Otro tipo de organismos que se han encontrado en suelos contaminados con hidrocarburos son los nemátodos (gusanos redondos), que son los metazoos más abundantes en el edafón. Ellos requieren de una película de agua para poder moverse, alimentarse y reproducirse, además de que poseen mecanismos evolucionados para sobrevivir en condiciones desfavorables (criptobiosis, una disminución del metabolismo que es indetectable). Los nemátodos del suelo se encuentran en cantidades cercanas a 30 millones ind/m² en el bosque de Oak (Volz, 1951; en Bardgett, 2005) y 10 millones ind/m² en suelos altamente productivos utilizados para el pastoreo (Yeates *et al.* 1997a; en Bardgett, 2005), incluso en suelos contaminados con metales pesados, pueden alcanzar cantidades de 260000 ind/m² (Bardgett *et al.* 1994; en Bardgett, 2005).

El papel de los nemátodos del suelo se relaciona a sus actividades alimenticias, ya que pueden ser vía directa en la excreción de nutrientes biodisponibles al suelo o de una forma indirecta, modificando el tamaño, composición y actividad de la comunidad microbiana (Bardgett, 2005). Debido a esto, ellos ocupan posiciones clave como consumidores secundarios e intermediarios en la red trófica del suelo. Asimismo, entre los nemátodos del suelo se encuentran presentes tanto los estrategias *r* como los estrategias *k*. Los estrategias *r* tienen un rápido crecimiento poblacional, son de tamaños pequeños, tienen una tasa de reproducción alta y producen mucha descendencia. Por otra parte, los estrategias *k* tienen un crecimiento poblacional lento, generalmente tienen tamaños grandes, su tasa de reproducción es baja y tienen poca descendencia pero hay mucho cuidado parental. Además, los nemátodos: a) Se encuentran en todos los lugares donde se produce la descomposición de la MO; b) Su morfología refleja sus hábitos alimenticios; c) Tienen importancia relevante en las interacciones con la demás biota del suelo; d) Tienen respuestas cortas en el tiempo; y e) Se pueden aislar fácilmente del suelo (Bongers *et al.*, 1998).

Por tales razones, los nemátodos son un eficiente instrumento para los investigadores en la evaluación biológica de la calidad y el funcionamiento del

suelo. Por tal motivo, la importancia de conocer los grupos tróficos principales (fitófagos, fungívoros, bacterívoros, omnívoros y depredadores) (Fig. 6) e interpretar la diversidad y función de la estructura de la comunidad de nemátodos del suelo y su ensamble con la demás biota, ofrece una estimación *in situ* del estado de perturbación, por lo cual; deben ser considerados en la investigación dedicada a los efectos de la contaminación.

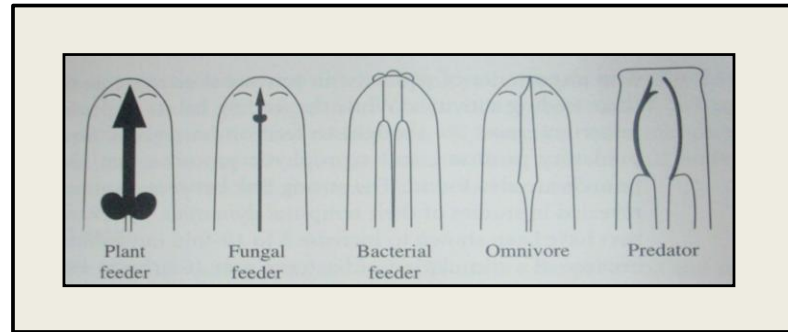


Fig. 6. Esquema de los grupos tróficos principales encontrados en el suelo (Redrawn from Bardgett and Griffith 1997).

Por lo anterior, en el presente estudio se formuló la siguiente pregunta *¿Cuál es la estructura trófica de la comunidad de nemátodos de vida libre en un suelo contaminado con combustóleo (SC), con la existente en un suelo no contaminado (SNC); considerando el efecto que tiene la zona de raíces?*

Antecedentes

Carman *et al.*, (1995); encontraron que la abundancia total de la mesofauna disminuyó durante 28 días, después de que el suelo fue tratado con hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAHs). Sin embargo, la abundancia de nemátodos incremento en 4 de 5 concentraciones de los tratamientos con PAHs entre los días 14 y 28 con el mayor aumento en la abundancia de nemátodos a mayor concentración de PAHs.

Erstfeld *et al.*, (1999); encontraron una asociación positiva entre la abundancia de nemátodos y la concentración de PAHs.

Gen *et al.*, (2009); realizaron un estudio en 5 áreas contaminadas con metales pesados y PAHs (A-E), y encontraron que los nemátodos pertenecientes al grupo trófico de los bacterívoros fue el más abundante en las 5 áreas, principalmente concentrados en los sitios de mayor contaminación (A y B) donde representaron el 93,3% y 83,4% del total de nemátodos, respectivamente.

Hipótesis

El suelo no contaminado presentará más grupos tróficos de nemátodos que el suelo contaminado, principalmente en la zona de raíces que es donde hay mayor actividad biológica, y se espera un aumento en la abundancia de nemátodos bacterívoros en el SC, debido a que es el principal grupo que se ve favorecido por la presencia de bacterias degradadoras y/o tolerantes a los hidrocarburos.

Objetivo general

Comparar la estructura trófica de la comunidad de nemátodos de un suelo contaminado por combustóleo (SC), con la existente en un suelo no contaminado (SNC), considerando el efecto que tiene la zona de raíces.

Objetivos particulares

- ❖ Determinar la diversidad de la comunidad de nemátodos de: el suelo contaminado de la zona de raíz de *Stipa sp.* (SCZR), el suelo contaminado de la zona desnuda (SCZD), el suelo sin contaminar de la zona de raíz de *Zea mays* (SNCZR) y el suelo sin contaminar de la zona desnuda (SNCZD).
- ❖ Determinar humedad, contenido de hidrocarburos y materia orgánica.
- ❖ Comparar la comunidad de nemátodos de acuerdo con los géneros presentes.
- ❖ Comparar la comunidad de nemátodos de acuerdo con los grupos tróficos principales (fitófagos, fungívoros, bacterívoros, omnívoros y depredadores).

Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en 2 parcelas de uso agrícola, una de ellas contaminada con combustóleo, ambas parcelas se encuentran separadas por 40 m de distancia aproximadamente (Fig.7, 8 Y 9).

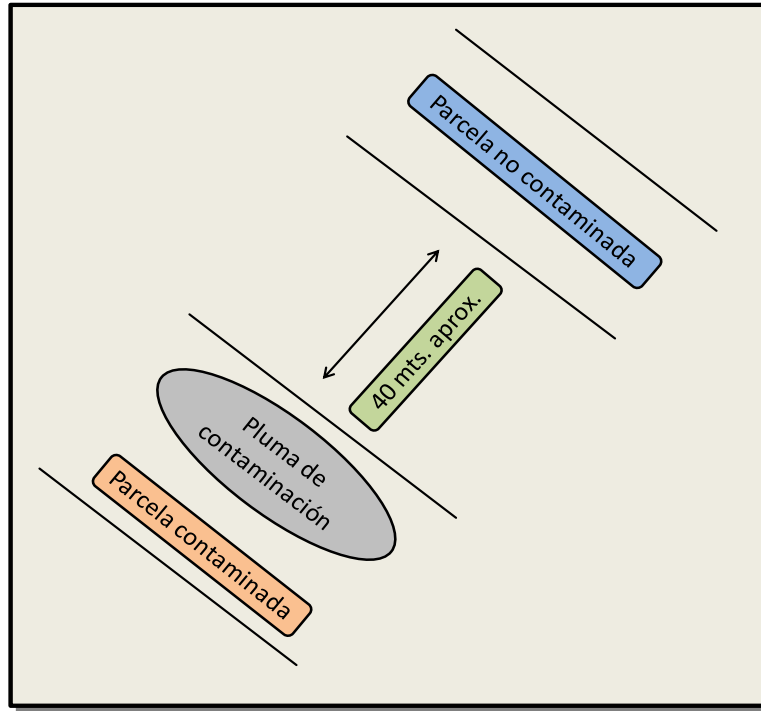


Fig. 7. Esquema de las parcelas de uso agrícola donde se realizó el estudio.



Fig. 8. Parcela contaminada en la que se muestra a *Stipa sp.*



Fig. 9. Parcela no contaminada en la que se muestra a *Zea mays*

Estas parcelas se ubican en el municipio de Jalacingo, Veracruz; que se encuentra en la zona centro del estado, en las coordenadas 19°48' de latitud norte y 97°18'

de longitud oeste, con una altitud de 1944 metros sobre el nivel del mar (Fig.10). Limita al norte con Tlapacoyan, al este con Atzalan y Altotonga, al sur con Perote y al oeste con el estado de Puebla, tiene una superficie de 287.95 km², cifra que representa el 0.39% del total del estado Su clima es templado-húmedo con una temperatura media anual de 13.9° C; la precipitación pluvial media anual es de 2,029.5 mm. Los ecosistemas que coexisten en el municipio son el de bosque formado por pinos, la fauna está compuesta por poblaciones de armadillos, conejos, mapaches, aves y reptiles. El suelo es de tipo andosol, feozem y luvisol, el mayor porcentaje se utiliza en agricultura y ganadería. El 70% del territorio municipal es agrícola, un 20% para viviendas, un 7% es destinado para comercios y un 3% para oficinas y espacios públicos.

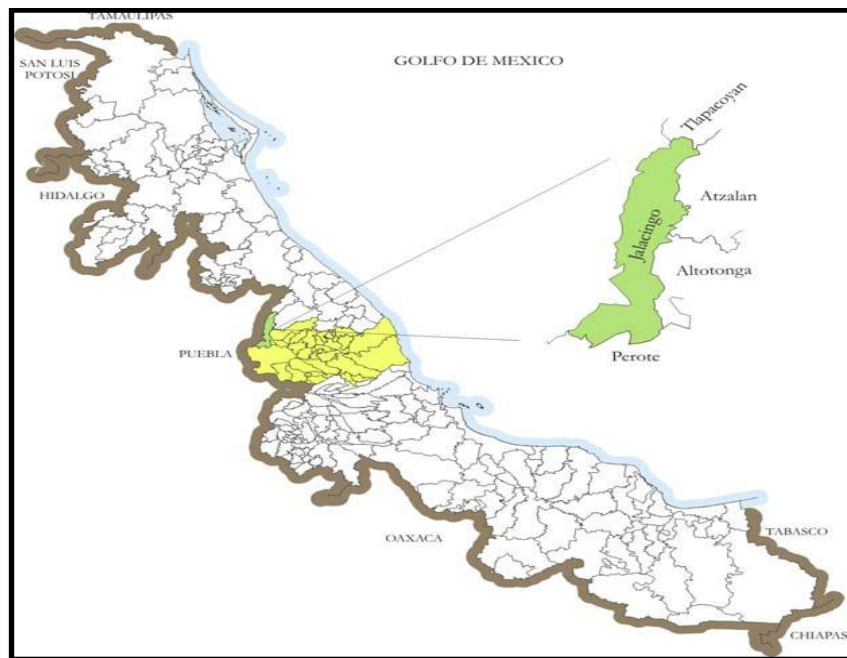


Fig. 10. Ubicación del municipio de Jalacingo, Veracruz.

Material y Métodos

Fase de campo

Se hizo un muestreo de tipo dirigido, c/u de las muestras fueron de 2 kg de suelo y se tomaron a una profundidad de 20 cm aproximadamente. Se muestrearon 6

lugares en SC: 3 de ellos se hicieron en la zona de raíz de *Stipa sp.* (Única planta que colonizaba el suelo donde se encontraba la pluma de contaminación), y las otras 3 se hicieron en el suelo sin planta o zona desnuda; por otra parte, en el suelo no contaminado se muestreó de la misma forma excepto que las muestras tomadas en la zona de raíz fueron debajo de *Zea mays*, (planta cultivada en esa parcela). Todas las muestras fueron almacenadas en bolsas de plástico herméticas Ziploc®.

Fase de laboratorio

A la llegada al laboratorio de microbiología en la FES Iztacala, UNAM; se realizó una mezcla de las 3 muestras tomadas para cada sitio del suelo, es decir, se obtuvieron un total de 4 mezclas; la primera es la de suelo contaminado de la zona de raíz de *Stipa sp.* (SCZR), la segunda es la de suelo contaminado de la zona sin planta o zona desnuda (SCZD), la tercera es la de suelo no contaminado de la zona de raíz de *Zea mays* (SNCZR) y la cuarta es la de suelo no contaminado de la zona desnuda (SNCZD). A c/u de las 4 mezclas se les midió humedad (HS) por el método gravimétrico, calculando la diferencia entre el peso inicial de una submuestra del suelo y el peso después de haberse secado en una estufa a una temperatura de 60 °C por un mínimo de 72 h. Asimismo c/u de las mezclas fueron tamizadas con una malla del número 10 (2 mm) para eliminar las partículas de la raíz, así como de otros desechos orgánicos y posteriormente se almacenaron a 4°C.

Posteriormente se midió la concentración de hidrocarburos, enviando las muestras del SC a la Universidad Veracruzana para la cuantificación de hidrocarburos totales. También se determinó la materia orgánica total (MO) usando el método desarrollado por Walkley y Black (1947), el cual se basa en la oxidación de materia orgánica por los ácidos crómico y sulfúrico.

Obtención, observación e identificación de nemátodos

La obtención de nemátodos se hizo enseguida que se realizaron las muestras compuestas. Para esto se utilizó el método del embudo de Baermann (Hall, 1995),

pesando 100g de suelo de c/u de las mezclas y colocándolas en los embudos, dentro de ellos se colocó un filtro de tela y se les agregó agua destilada hasta inundar las muestras (Fig. 11). Se realizaron 4 repeticiones por mezcla, es decir, se obtuvieron 20 muestras por mezcla en total. Los nemátodos se extrajeron 48 horas después, conteniéndolos en pequeños recipientes y agregando a c/u de ellos 5 ml de formaldehído (4%) para su fijación, sumando un volumen total de 100 ml en c/u de los recipientes.



Fig. 11. Embudo de Baermann utilizado en la extracción de nemátodos.

Para la observación de las muestras se tomó una alícuota de 5 ml de c/u de los recipientes (4 repeticiones) con una pipeta Pasteur, éstas alícuotas se observaron a través del microscopio invertido a 10x y 20x para localizar, contar y extraer a c/u de los nemátodos encontrados y posteriormente cada nemátodo fue observado a través del microscopio óptico a 10x y 40x y se le tomaron fotos (Camara Nikon COOLPIX P5100). La identificación se realizó a través de la página web <http://nematode.unl.edu/> de la Universidad de Nebraska y claves de Jairajpuri *et al.*, (1992). La identificación fue en base a estructuras morfológicas, (especialmente las del tipo alimenticio) se hizo hasta género, ya que para ubicarlos en alguno de los 5 grupos tróficos principales, basta con ese nivel de identificación.

Índices ecológicos y análisis estadísticos

Por último, las características de la comunidad de nemátodos fueron descritas utilizando: 1) Abundancia absoluta de individuos en 100 g de suelo; 2) Abundancia de nemátodos: Fitófagos (F), Fungívoros (FF), Bacterívoros (B), Depredadores (D) y Omnívoros (O) ; 3) Índice de Shannon-Weaver (H'), una medida de diversidad de especies que le da más peso a las especies raras $H' = [-\sum P_i (\ln P_i)]$, donde P es la proporción de individuos en el taxón i -th; 4) Índice de madurez (MI), $MI = \sum v_i p_i$ donde v_i , es el valor $c-p$ del genero i -th en los nemátodos y p_i , la proporción del género en la comunidad de nemátodos, los valores $c-p$ describen las estrategias de vida de los nemátodos en un intervalo de 1 (colonizadores, tolerantes a la perturbación) a 5 (persistentes, sensibles a la perturbación); 3) Radio Fungívoro/Bacterívoro (H/B), el cual muestra si la de descomposición de la materia es por vía bacteriana (rápida) o por vía fúngica (lenta); 4) Índice de similitud de Sørensen ($QS=2C/A+B$), donde A y B son el número de especies de las muestras A y B respectivamente, y C es el número de especies compartidas por las 2 muestras.

Finalmente se probó si hubo diferencias significativas entre los grupos tróficos y entre los diferentes índices aplicando la prueba de de JI-cuadrada ($P<0.05$). En tanto que los parámetros fisicoquímicos fueron tratados con la prueba de t para muestras independientes ($P<0.05$).

Resultados

Humedad relativa del suelo (HS)

Los valores de HS para ambos suelos (SC y SNC) no fueron significativamente diferentes ($n=2$, $P<0.05$), a pesar de ello, se aprecia un mayor porcentaje de HS en el SNC, por otra parte no hay mayor diferencia entre la zona de raíces y la zona desnuda en c/u de los suelos (Tabla 1 y fig. 12).

Tabla 1. Humedad relativa de 2 suelos agrícolas de Jalacingo Ver.

Humedad	
Muestra	% HS
SC	8.75
SCZR	9
SCZD	8.5
SNC	9.65
SNCZR	9.8
SNCZD	9.5

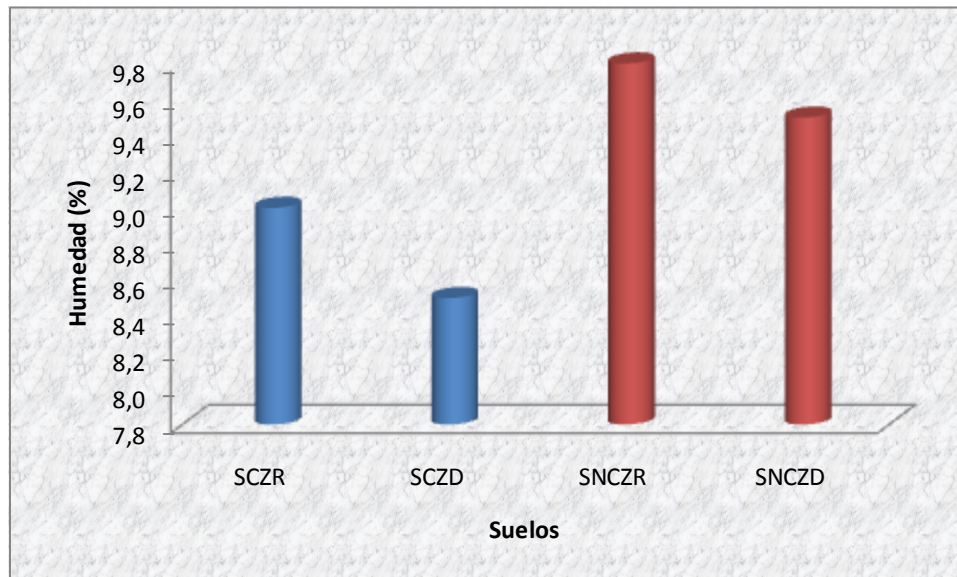


Fig. 12. Humedad relativa de 2 suelos agrícolas de Jalacingo Ver.

Materia orgánica

Los porcentajes de MO fueron significativamente diferentes en ambos suelos ($n=2$, $P<0.05$), teniendo un mayor contenido en el SC y encontrándose en la categoría de rico por otro lado el SNC a pesar de tener el menor porcentaje de MO se clasificó en la categoría de moderadamente rico (Tabla 2 y fig.13).

Tabla 2. Materia orgánica de 2 suelos agrícolas de Jalacingo Ver.

Materia orgánica		
Muestra	% MO	Categoría
SC	7.2	Rico
SCZR	6.9	Rico
SCZD	7.4	Rico
SNC	3.1	Moderadamente rico
SNCZR	3.4	Moderadamente rico
SNCZD	2.8	Moderadamente rico

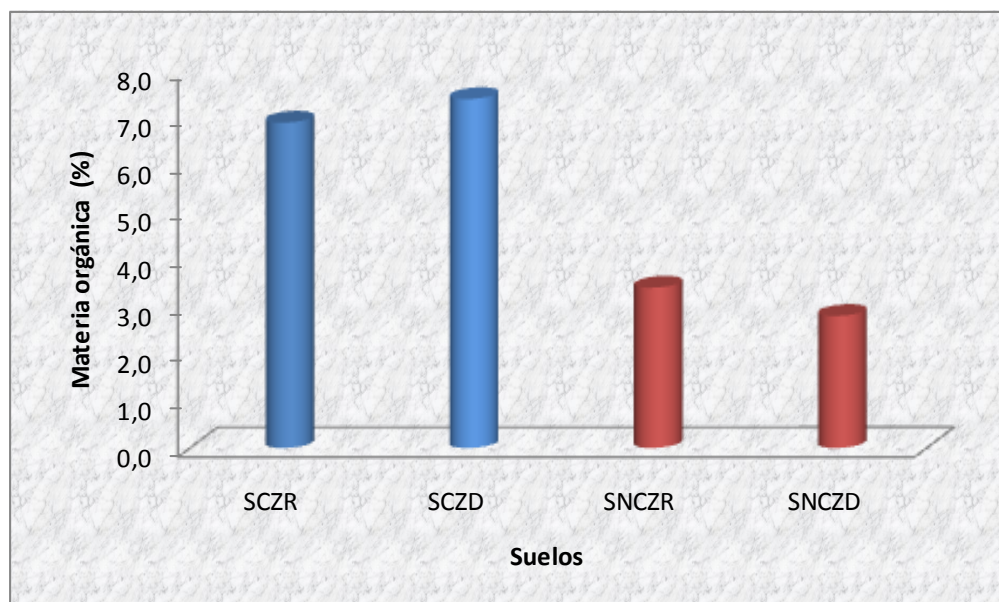


Fig. 13. Materia orgánica de 2 suelos agrícolas de Jalacingo Ver.

Hidrocarburos

La concentración de hidrocarburos debido a la presencia del combustóleo en el SC fue de 50 000 ppm la cual representa el 5% del total del suelo.

Nemátodos

El número total de nemátodos en este estudio fue de 471 Ind. /100 g de suelo seco, distribuidos en 13 familias y 25 géneros (Tabla 3). Hubo diferencias significativas ($P < 0.05$), el SC fue el que tuvo la mayor abundancia con 419 ind. /100 g representando el 88.9% de los nemátodos encontrados, de los cuales 384 ind. /100 g pertenecieron al SCZR y 35 al SCZD. Por otra parte en el SNC solo se encontraron 52 ind. /100 g, siendo el SNCZR el que presentó menos abundancia de todos los suelos con tan solo 23 ind. /100 g. (Fig. 14).

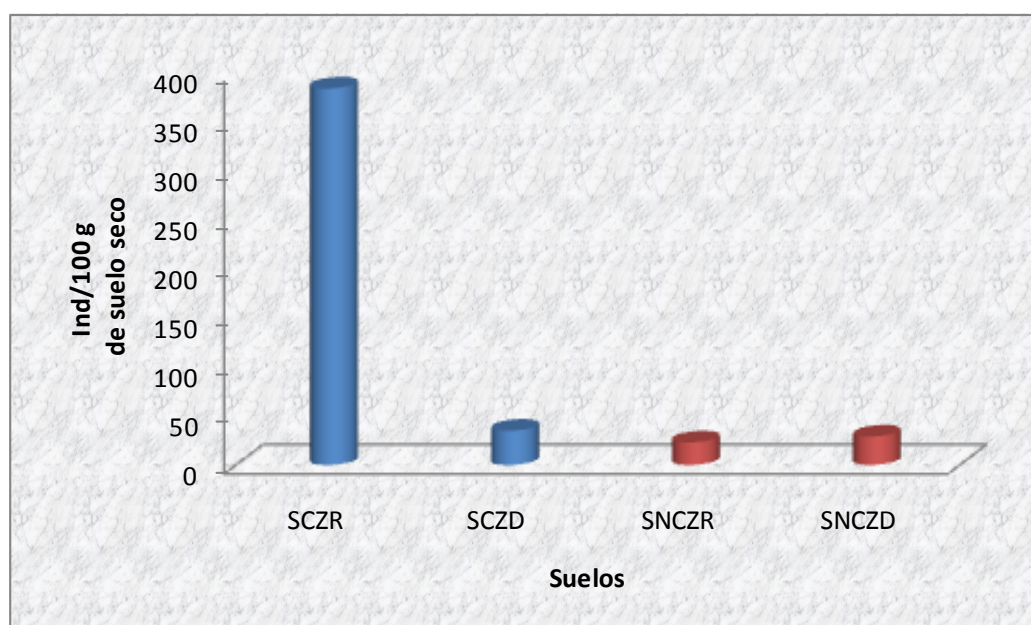


Fig. 14. Abundancia de nemátodos en el SCZR, SCZD, SNCZR y SNCZD.

Abreviaciones utilizadas para la designación de las zonas del suelo en las que se tomaron las muestras.

SCZR: Suelo contaminado de la zona de raíz.

SCZD: Suelo contaminado de la zona desnuda o sin planta.

SNCZR: Suelo no contaminado de la zona de raíz.

SNCZD: Suelo no contaminado de la zona desnuda o sin planta.

Con respecto a la riqueza, solamente en el SC estuvieron presentes los 25 géneros encontrados en este trabajo, específicamente el SCZR fue el que ostentó los 25 géneros, el SCZD compartió únicamente 5 géneros con el primero. Por otra parte, en el SNC solo se encontraron 8 géneros, todos ellos compartidos con el SC (Fig. 15). *Acrobeloides*, *Aphelenchoides*, *Acrobeles*, *Helicotylenchus* y *Panagrolaimus* fueron los géneros más comunes en estudio, sin embargo, solo *Acrobeles* y *Aphelenchoides* estuvieron presentes en todos los suelos. Por otra parte, los géneros raros fueron *Anguina*, *Campydora*, *Cervidellus*, *Eucephalobus*, *Eudorylaimus* y *Filenchus*; todos ellos con tan solo 1 ind. /100 g y encontrados únicamente en el SCZR. Las familias más abundantes fueron Cephalobidae, Aphelenchoidea y Hoplolaimidae (Tabla 3).

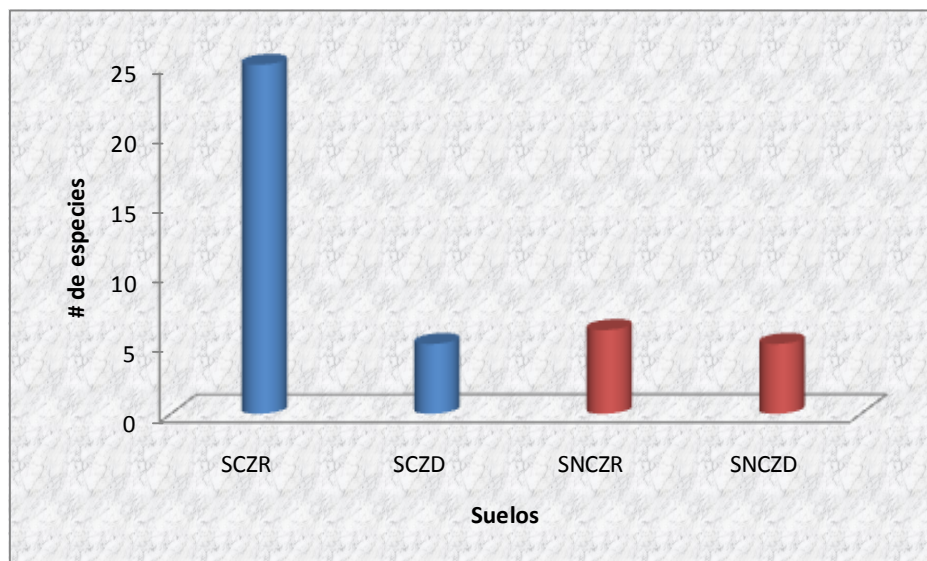


Fig. 15. Riqueza de especies en el SCZR, SCZD, SNCZR y SNCZD.

Escala colonizador-persistente (c-p): Asignación de los taxa de nemátodos del suelo y dulceacuícolas a una escala lineal del 1 al 5 de acuerdo a sus características *r* y *k*.

c-p1: Tiempo generacional corto, huevos pequeños, tasa alta de fecundidad, principalmente bacterívoros, se alimentan de manera continua en medio enriquecidos.

c-p2: Tiempo generacional más largo y con menor fecundidad que el grupo *c-p* 1, muy tolerante a condiciones adversas y puede ser criptobiótico. Principalmente son bacterívoros y fungívoros.

c-p3: Tiempo generacional largo, una mayor sensibilidad a condiciones adversas. fungívoros, bacterívoros y depredadores.

c-p4: Tiempo generacional largo, tasa baja de fecundidad, gran sensibilidad a perturbación. Especies pequeñas de omnívoros.

c-p5: Tienen el tiempo generacional más largo, el tamaño de cuerpo más grande, mayor sensibilidad a perturbación, predominan los omnívoros y depredadores.

Adaptado desde Bongers (1990) Bongers and Bongers (1998), Ferris *et al.* (1999), Martinez (1992) and Wilson (1999).

Tabla 3. Abundancia de nemátodos encontrados en el SCZR, SCZD, SNCZR y el SNCZD.

Familia	Género	SC	SCZR	SCZD	SNC	SNCZR	SNCZD	Grupos tróficos	c-p	
Cephalobidae	<i>Acrobeles</i>	99	72	27	3	2	1	102	B	2
Cephalobidae	<i>Acrobeloides</i>	146	146	----	5	----	5	151	B	2
Aporcelaimidae	<i>Akrotonus</i>	2	2	----	----	----	----	2	O	5
Alaimidae	<i>Alaimus</i>	2	2	----	----	----	----	2	B	4
Anguinidae	<i>Anguina</i>	1	1	----	----	----	----	1	F	2
Aphelenchoididae	<i>Aphelenchoides</i>	103	102	1	35	14	21	138	F ó FF	2
Aporcelaimidae	<i>Aporcelaimus</i>	2	2	----	1	----	1	3	D ú O	5
Tylenchidae	<i>Basiria</i>	2	2	----	----	----	----	2	F	2
Tylenchidae	<i>Belondira</i>	3	3	----	----	----	----	3	F	2
Tylenchidae	<i>Boleodorus</i>	2	1	1	----	----	----	2	F ó FF	2
Campydoridae	<i>Campydora</i>	1	1	----	----	----	----	1	O	----
Cephalobidae	<i>Cephalobus</i>	2	2	----	----	----	----	2	B	2
Cephalobidae	<i>Cervidellus</i>	1	1	----	----	----	----	1	B	2
Anguinidae	<i>Ditylenchus</i>	3	3	----	2	1	1	5	F ó FF	2
Leptonchidae	<i>Doryllium</i>	2	2	----	----	----	----	2	FF	4
Cephalobidae	<i>Eucephalobus</i>	1	1	----	----	----	----	1	B	2
Dorylaimidae	<i>Eudorylaimus</i>	1	1	----	----	----	----	1	D ú O	4
Tylenchidae	<i>Filenchus</i>	1	1	----	----	----	----	1	F	2
Hoplolaimidae	<i>Helicotylenchus</i>	23	23	----	3	3	----	26	F	3
Cephalobidae	<i>Heterocephalobus</i>	2	1	1	----	----	----	2	B	2
Hoplolaimidae	<i>Hoplolaimus</i>	1	1	----	1	1	----	2	F	3
Longidoridae	<i>Longidorus</i>	2	2	----	----	----	----	2	F	5
Panagrolaimidae	<i>Panagrolaimus</i>	10	5	5	2	2	----	12	B	1
Pratylenchidae	<i>Pratylenchus</i>	2	2	----	----	----	----	2	F	3
Dorylaimidae	<i>Pungetus</i>	5	5	----	----	----	----		F, D ú O	4
Σ		419	384	35	52	23	29			

Estructura trófica

La abundancia de todos los grupos tróficos fue mayor en el SC que en el SNC y tuvieron diferencias significativas ($P < 0.05$). De los 25 géneros encontrados en ambos suelos, 19 fueron fitófagos, 10 fungívoros, 15 bacterívoros, 4 depredadores y 6 omnívoros; tomando en cuenta que varios de los géneros compartieron diferentes grupos tróficos. El más abundante fue el de los bacterívoros con 273 ind. seguido de los fitófagos y de los fungívoros con 114 y 76 ind. respectivamente. Sin embargo, los bacterívoros solo fueron muy abundantes en el SC ya que en el SNC el grupo más abundante fue el de los fitófagos. Por otra parte los omnívoros y depredadores solo se encontraron presentes con 7 y 4 ind respectivamente y estuvieron ausentes tanto en el SCZD y el SNCZR (Tabla 4 y fig. 17).

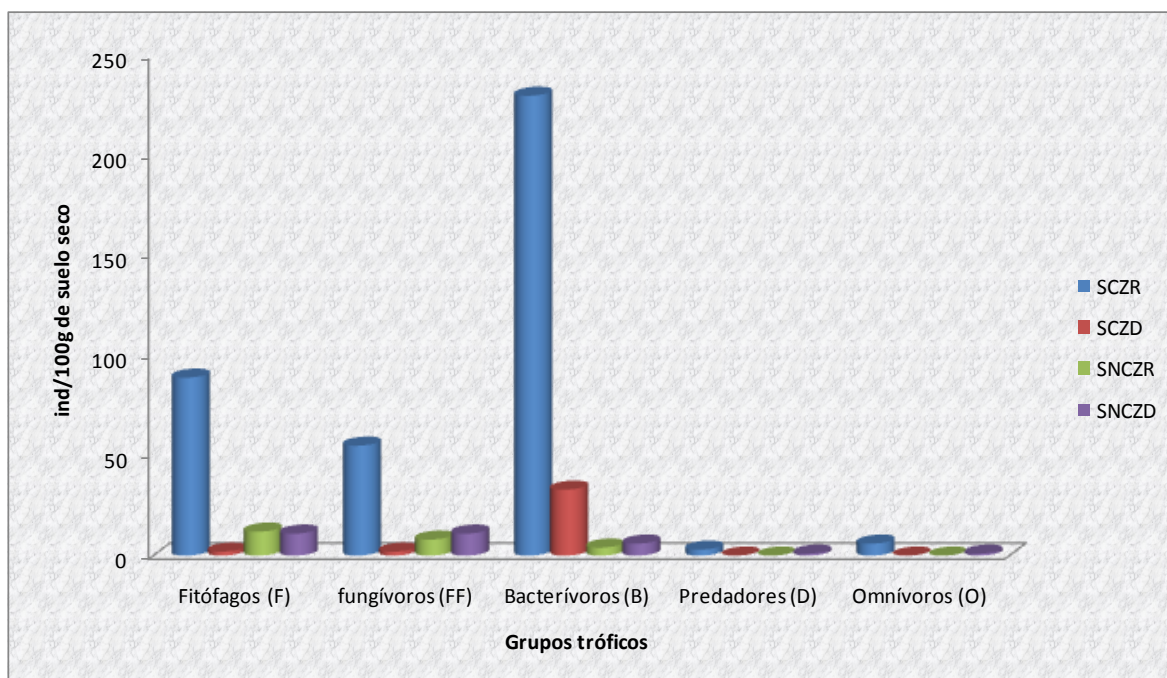


Fig. 17. Estructura trófica de la comunidad de nemátodos en SCZR, SCZD, SNCZR y SNCZD.

Índices ecológicos

Índice de Shannon-Weaver (H')

La diversidad fue muy similar tanto en el SC ($H'=1.95$) como en el SNC ($H'=1.73$), no obstante en ambos suelos la presencia de las raíces mostró un aumento en la diversidad en comparación con el suelo desnudo, a pesar de ello no hubo diferencias significativas ($P<0.05$) (Tabla 4).

Índice de madurez (IM)

Este índice no mostró diferencias significativas entre los tratamientos ($P<0.05$). Los valores fueron muy parecidos en ambos suelos, no importando la presencia de las raíces (Tabla 4).

Radio Fungívoro/Bacterívoro (FF/B)

Los valores variaron en el SC con 0.21 y 1.90 para el SNC, sin embargo no se encontraron diferencias significativas ($P<0.05$) (Tabla 4). Entre las zonas para c/u de los suelos los valores se mantuvieron muy similares.

Índice de similitud de Sørensen

Este índice se basó únicamente en los géneros presentes, comparando la comunidad de nemátodos tanto del SC como la del SNC. El porcentaje de información compartida entre ambos suelos fue de 48.48%.

Tabla 4. Índices ecológicos y estructura trófica de los nemátodos en SCZR, SCZD, SNCZR y SNCZD.

Índices	SC	SCZR	SCZD	SNC	SNCZR	SNCZD
Shannon-Weaver (H')	1.95	1.75	0.78	1.73	1.27	0.89
Índice de madurez (IM)	2.12	2.15	1.86	2.09	2.09	2.10
Relación (FF/B)	0.21	0.5	0.67	1.90	1	1
Estructura trófica						
Fitófagos (F)	91	89	2	23	12	11
Fungívoros (FF)	57	55	2	19	8	11
Bacterívoros (B)	263	230	33	10	4	6
Depredadores (D)	3	3	0	1	0	1
Omnívoros (O)	6	6	0	1	0	1

- ♣ Todos los índices se basaron sobre la abundancia relativa.
- ♣ En el **IM**, valores inferiores a 2 manifiesta un sistema perturbado y enriquecido con nutrientes y valores cercanos a 4 solamente lo ostentan ambientes no perturbados.
- ♣ En la relación **FF/B** los valores menores a 1 significa que la vía de descomposición es llevada a cabo por las bacterias, mientras que valores mayores a 1 indican que la descomposición está dada por los hongos.

Discusión

El efecto tóxico de la contaminación por hidrocarburos en el suelo y en las plantas se ha cuestionado por años. Plice (1948), encontró que el petróleo crudo agregado a un suelo arenoso en proporción de 0.75% estimulaba el crecimiento de soya (leguminosa), mientras que con un incremento de 4% del hidrocarburo las mismas plantas morían. En el presente estudio, el porcentaje de hidrocarburos fue de 5% en proporción con el suelo, lo que indica que la contaminación ya es considerable para que haya una perturbación hacia las plantas y subsecuentemente a los microorganismos asociados a ellas.

Asimismo, se ha demostrado que las plantas pertenecientes a la familia de las gramíneas son resistentes a la contaminación por el combustóleo. Este es el caso de *Stipa sp.*, planta que poblaba el SC, su presencia es debido a que las gramíneas presentan sistemas radiculares extensos y fibrosos, características que les confiere mayor resistencia y les permite tener mayor área de superficie de raíz por m³, teniendo mejor captación de agua y nutrientes (Aprill and Simd, 1990; en Sangabriel *et al.*, 2006). Además, debemos de considerar que la concentración de hidrocarburos en el suelo fue de 50,000 ppm a 6 años aproximadamente que ocurrió la contaminación, esto último es muy importante, debido a que ésta concentración se va modificando de acuerdo al tiempo y la cantidad de combustóleo que se hayan derramado sobre el suelo en un inicio (Martínez and López, 2001). Esto último, es importante para la colonización de los microorganismos en el suelo, los cuales van propiciando las condiciones favorables para el establecimiento de plantas como *Stipa sp.*

Dentro del edafón se encuentran los nemátodos, los cuales son buenos indicadores de contaminación por hidrocarburos, debido a que poseen una cutícula permeable y están en contacto con las partículas del suelo y la contaminación (Blakely *et al.*, 2002). Asimismo, los nemátodos requieren de una película de agua para poder moverse, alimentarse y reproducirse (Bargett, 2005). De esta forma, la importancia principal del agua en el suelo es proporcionar la humedad necesaria para la realización de las actividades metabólicas tanto de los

microorganismos como de las plantas (Lynch *et al.*, 2002). En el 2009, Gen *et al.* observaron que el contenido de humedad del suelo (HS) varió de 10.33%-19.3% en las 5 áreas (A-E) contaminadas (PAHs y metales pesados) que estudiaron. En otro trabajo sobre suelos contaminados con hidrocarburos como el de Sangabriel *et al.*, (2006), establecieron su experimento con una HS de 63-71%. Del mismo modo la US EPA (2006); maneja que el contenido de HS cercano al 12-30% de peso, es óptimo para la biodegradación de hidrocarburos del petróleo. Con respecto a lo anterior, en este estudio los valores de HS observada en ambos suelos (SC y SNC) fueron bajos, considerando que el muestreo se hizo a mediados de octubre, es decir; cuando apenas había pasado la época de lluvias en el municipio de Jalacingo. No obstante, debemos tomar en cuenta que la capacidad para retener agua y la libertad de ésta para moverse dentro del suelo depende de 2 propiedades: El contenido coloidal de humus y arcillas, que determinan el área superficial total y la cantidad de agua que puede ser retenida, y por otra parte; también depende de la proporción y el tamaño de los poros así como de su continuidad (Singer, 1992). A pesar de que la HS se mantuvo baja, en la literatura se ha reportado que poblaciones de nemátodos bacterívoros (por ej. *Rhabditis*, *Cephalobus* y *Pristionchus*) se siguen reproduciendo en suelos incluso cuando la humedad se acerca al punto de marchitez y las películas de agua son de 1 μ (Yeates *et al.*, 2002 en Gaugler and Bilgrami, 2004). Esto último es fundamental para entender la presencia de los nemátodos, debido a que ellos tienen la capacidad de resistir ante los contaminantes, la deshidratación y otras condiciones adversas; esto porque la mayoría de los nemátodos encontrados en este estudio son colonizadores-oportunistas, los cuales poseen una cutícula menos permeable, pueden producir larvas dauer (que en alemán significa de duración) y tienen una alta reproducción potencial; propiedades que los caracterizan como estrategias *r* (Ritz and Trudgill, 1999).

Otro de los parámetros fue la MO, que en los suelos se forma y se acumula por incorporación de residuos vegetales a nivel rizósfera y por la caída de las hojas, frutos, cortezas, así como aquella incorporada por los productos de descomposición de la biota del suelo y por cadáveres de la misma (Aguilera, 1989).

Se ha reportado que en los suelos contaminados con gas natural o petróleo crudo muestran un incremento comparada con la encontrada en los suelos no contaminados (Ellis and Adams, 1960; en Martínez and López 2001). En este estudio, se observó que en el SC hay un 131.29% más contenido de MO con respecto al SNC, esto debido a la presencia del combustóleo y a la técnica empleada, ya que ésta cuantificó el contenido de MO como la suma de MO de fácil degradación (por la descomposición de la biota) y la suma de MO recalcitrante (por hidrocarburos del combustóleo). Asimismo, el combustóleo está conformado con estructuras de C₂₅ a C₃₅ correspondientes a compuestos saturados, poliaromáticos y de cadena larga que son difíciles de oxidar en las condiciones del método Walkley-Black, por lo que solo una parte de sus componentes es de fácil oxidación, los cuales reaccionan dando valores menores comparados con otros hidrocarburos como el diesel o la gasolina (Martínez and López 2001). Esto indica que un porcentaje considerable del combustóleo no es fácilmente oxidable y el aumento de la MO total en el SC fue debido a la MO recalcitrante, siendo ésta; difícil de degradar para la mayoría de los descomponedores del suelo tales como las bacterias y los hongos. La importancia de la MO para los nemátodos, se debe a que ellos se encuentran principalmente en los lugares donde se lleva a cabo la descomposición de la misma.

La abundancia relativa de individuos fue mayor en el SC con respecto al SNC. Asimismo en el SC, la zona de raíces jugó un papel importante para los nemátodos, ya que aquí se presentó la mayor abundancia, contrastando de manera significativa con el SC de la zona desnuda, que presentó la menor abundancia inclusive que en el SNC; esto se debe a que en las zonas de raíces hay secreciones de exudados, los cuales contribuyen a la proliferación de microorganismos clave para la desintoxicación y la degradación de contaminantes en el suelo (Davis *et al.* 2002; en Sangabriel *et al.*, 2006). Entre estos microorganismos se encuentran las bacterias y los hongos que tienen la capacidad de tolerar y/o consumir a los hidrocarburos, debido a que ellos los pueden utilizar como fuente directa de carbono, a su vez; permiten que ésta MO recalcitrante sea metabolizada, forme parte de su biomasa y este biodisponible a

través de sus desechos orgánicos. Del mismo modo, la presencia de los nemátodos es importante, debido a que ellos son de los principales consumidores de bacterias y de hongos en el suelo, y de esta forma permiten que haya un continuo flujo de MO recalcitrante a MO de fácil degradación. Por otra parte, algunos nemátodos se alimentan directamente de las raíces de las plantas, estas últimas ayudan a limpiar o estabilizar un contaminante en el suelo (Cunningham *et al.* 1996; en Sangabriel *et al.*, 2006), este proceso es conocido como fitorremediación, que en última estancia consiste en el metabolismo de contaminantes dentro de los tejidos de las plantas, a través de enzimas que catalizan su degradación (Sellers, 1999; en Volke and Velasco, 2002). Todo lo anterior es muy importante, ya que contribuye de forma significativa en la reducción, remoción, degradación o estabilización de los contaminantes en el suelo (Cunningham *et al.* 1996; en Sangabriel *et al.*, 2006). Con respecto al SNC, la abundancia fue baja y más homogénea, esto puede deberse a que posiblemente exista otro tipo de perturbación en este suelo.

La riqueza de géneros fue mayor en el SC comparado con el SNC. A su vez, los géneros más abundantes en ambos suelos fueron *Acroboloides*, *Acrobeles*, *Aphelenchoides*, y *Helicotylenchus*. Los 2 primeros pertenecientes a la familia Cephalobidae, el tercero a Aphelenchoidae y el cuarto a Hoplolaimidae. Las familias Cephalobidae y Aphelenchoidae pertenecen a la clase *c-p2*, las cuales se han reportado que tienen una gran amplitud ecológica, adaptadas a condiciones debido a su prolongado estado criptobiótico. Otra característica importante es la estructura bucal probolae, la cual es usada para raspar su alimento de superficies duras, de esta manera, permiten que estas familias sean tolerantes a condiciones de contaminación más que otros taxa (Ferris, 2001). Por otra parte, la familia Hoplolaimidae pertenece a la clase *c-p3*, que si bien los nemátodos pertenecientes a esta familia pueden ser resistentes a perturbaciones, no lo son tanto como los de la clase *c-p2*. En general la mayoría de las familias encontradas pertenecieron a la clase *c-p2*, lo cual revela que hay un grado de perturbación considerable en ambos suelos. Asimismo, debemos considerar que los efectos de perturbación influyen sobre los procesos ecológicos en los suelos, que a su vez; se ven

reflejados por los cambios estructurales y funcionales en la comunidad de nemátodos (De Goede and Bongers, 1994).

La comunidad de nemátodos a su vez, está integrada en la estructura trófica, que es uno de los atributos más importantes de las comunidades ecológicas, la cual muestra el flujo de materia y energía entre los diferentes tipos de organismos (Bell, 2007). En este estudio, el grupo trófico de nemátodos más abundantes fue el de los bacterívoros, siendo dominantes en el SC de la zona de raíces, lo cual es el resultado a que después de la contaminación por el combustóleo, hubo un aumento de la MO recalcitrante, lo cual creó un medio de selección en el edafón, en el que únicamente las especies adaptadas a estas condiciones pudieron sobrevivir, este es el caso de algunas especies bacterianas, las cuales son capaces de utilizar PAHs de 2 a 4 anillos como fuente directa de energía (Sack *et al.*, 1997; en Blakely, 2002). Una vez establecidas este tipo de bacterias, permiten que los nemátodos al igual que otro tipo de microorganismos, como los protozoos, se establezcan en estas zonas contaminadas, debido a que muchos de ellos actúan como controladores de las comunidades bacterianas. A su vez, con el tiempo da paso a la colonización de la demás biota asociada al suelo así como al establecimiento vegetal, que crea puntos calientes (hot spots) en la zona de raíces, permitiendo mayor actividad y por tanto mayor degradación o estabilización del combustóleo.

En el SNC los bacterívoros fueron menos abundantes, probablemente porque en este suelo exista otro tipo de recursos que son más favorables para otros grupos tróficos como el de los fitófagos, que fue el segundo grupo que presentó mayor abundancia, siendo el más abundante en el SNC, además de que fue el que presentó mayor riqueza de géneros en ambos suelos. La abundancia de los fitófagos en el SC estuvo marcada por la presencia de *Stipa sp.*, ya que sus raíces les sirvieron de alimento y de refugio. Esto se observó de manera notoria debido a que la presencia fue escasa en el SC de la zona desnuda. Por otra parte, la dominancia de este grupo en el SNC de la zona de raíces fue debido a *Zea mays*, que fue la planta sembrada en esa temporada, ésta se encontraba aglomerada

entre los surcos, ocasionando que el espacio entre la zona de raíces de una planta y otra fuera más estrecho en comparación con *Stipa sp.*, la cual se encontraba más distante una de otra en el SC. La presencia de los fitófagos en el SNC de la zona desnuda es debido a que muchas de las raíces de las plantas sembradas en temporadas anteriores se quedan en el suelo, las cuales forman parte del recurso de estos nemátodos.

El tercer grupo trófico más abundante en ambos suelos fue el de los fungívoros. En el SC su presencia se debe a que algunos hongos pueden degradar compuestos con 2 o 4 anillos en la presencia de otras fuentes de carbono (Davis *et al.*, 1993; Gramss *et al.*, 1999; en Blakely, 2002), asimismo los compuestos recalcitrantes también son recursos para ellos (Ferris and Bongers, 2006). Esto último explica la presencia del grupo fungívoro en el SNC, debido a que de manera indirecta nos indica que pueden existir hongos que se estén comiendo los compuestos recalcitrantes presentes en este suelo.

La baja densidad de depredadores y omnívoros en ambos suelos es explicada porque la mayoría de ellos se encuentran ubicados dentro de las clases *c-p* 4 y *c-p* 5, que se caracterizan por tener gran sensibilidad a condiciones adversas, de igual forma se asume la importancia de la presencia de las raíces en el SC, debido a que más del 95% de estos 2 grupos se ubicaron únicamente en este suelo.

Una de las herramientas en ecología de la comunidad son los índices, los cuales condensan los datos en una o pocas variables para simplificar el análisis, interpretación o predicción sobre algún proceso ecológico (Wilson and Kakouli-Duarte, 2009). En este estudio se realizaron 4 índices ecológicos, el primero fue el índice de Shannon-Weaver (H'), el cual no mostró diferencias significativas entre el SC y el SNC, sin embargo, tanto en el SC como el SNC la diversidad fue mayor en la zona de raíces, debido a que esta zona funciona como un punto caliente “hot spot” para los nemátodos y los demás microorganismos del suelo, ya que en esta zona hay un continuo flujo de sustratos orgánicos (Lynch *et al.*, 2002), el cual atrae a una gran diversidad de microorganismos que pueden ser potenciales presas para los nemátodos.

Otro de los índices con mayor importancia es el de madurez (IM), que de acuerdo con Bongers and Ferris (1999), refleja los niveles de perturbación en los suelos, ya que un valor inferior a 2 manifiesta un sistema perturbado y enriquecido con nutrientes, y valores cercanos a 4 solamente lo ostentan ambientes no perturbados. Aquí el IM no mostró diferencias significativas sin embargo, los valores obtenidos se encontraron alrededor de 2, lo que muestra que ambos suelos se localizan dentro de sistemas perturbados enriquecidos con nutrientes.

En el SC, los valores son explicados por el enriquecimiento de MO debido a la presencia del combustóleo, el cual fue explicado anteriormente. Por otra parte, los valores bajos del IM en el SNC, se debieron a que son suelos agrícolas, los cuales tienen prácticas como la incorporación de fertilizantes para mejorar la productividad, lo que promueve gran actividad microbiana que proporciona recursos para los nemátodos oportunistas (estrategas *r*), por otro lado; se encuentra la labranza, que en este tipo de suelos ocurre con frecuencia, provocando que los horizontes del mismo se pierdan. Estos 2 factores inducen una perturbación en el SNC incluso mayor que la provocada por el combustóleo, esto según los valores del IM y la diversidad de nemátodos encontrada en ambos suelos.

El IM también disminuye como consecuencia de la desaparición de taxa que son más altos en la escala *c-p*. Estos taxa están compuestos principalmente de nemátodos depredadores y omnívoros los cuales se vieron disminuidos en ambos suelos; siendo un punto importante debido a que la presencia de estos 2 grupos tróficos junto con otros organismos, juegan el papel de reguladores dentro de la red trófica, además de que amortiguan brotes de enfermedades en las plantas que son transmitidas a través del suelo (Bongers and Ferris, 1999).

Por otra parte, tenemos la vías de descomposición de la MO que son expresadas por el radio Fungívoro/Bacterívoro (FF/B), el cual indica que cuando el valor es menor a 1, la vía de descomposición es llevada a cabo por las bacterias y cuando los valores son mayores a 1, la descomposición es por vía fúngica.

Los valores en el SC muestran claramente que la vía de descomposición es llevada a cabo por bacterias, lo que confirma de manera indirecta que hay presencia de bacterias degradadoras de hidrocarburos, por otro lado en el SNC; los valores altos revelan que la vía de descomposición es llevada a cabo por los hongos, lo que indica que en este suelo es posible que haya compuestos recalcitrantes.

Por otra parte, hay índices que explican la similitud entre las comunidades de nemátodos del SC con respecto a la del SNC, uno de ellos es el índice de Sørensen. Se observó que los valores de este índice de similitud fueron bajos, debido a que únicamente compartieron el 48.48% de sus géneros. Esto se debió a la mayor diversidad que tuvo la comunidad del SC, que como ya mencionó anteriormente, quizá fue debida a que en el SNC exista otro tipo de perturbación que su vez hizo disminuir en un mayor grado su diversidad.

En este estudio tanto los parámetros como los índices nos revelaron la relación de la estructura trófica de nemátodos con respecto a algunos procesos que están ocurriendo en ambos suelos. Uno de los más importantes es la degradación de los hidrocarburos en el SC, debido a que los nemátodos oportunistas incrementaron en números más rápidamente que las especies persistentes, esto en respuesta a un incremento en la actividad microbiana causada por la presencia de la MO recalcitrante.

A pesar del tiempo de contaminación, el IM de comunidad de nemátodos nos indicó que el SC sigue con un grado de perturbación alta, por otro lado, el SNC también reflejó un nivel de perturbación alto, probablemente por la acción física como la labranza o química por la incorporación de fertilizantes.

Por último, debemos tener en cuenta que los nemátodos al igual que cualquier otro grupo de organismos de la red trófica del suelo está sujeto a la depredación, así como a la culminación de su ciclo de vida, por lo que la evaluación de su abundancia, riqueza, estructura y función de la comunidad debe verse reflejada en una escala espacio-temporal para que exista una representación holística del

comportamiento de la comunidad de nemátodos dentro de la red trófica de un suelo en particular. Mientras mejor entendamos estos enlaces de los nemátodos en relación con la demás biota, así como del tipo, concentración y frecuencia del contaminante; mayor será nuestra aproximación para resolver problemas como la contaminación por hidrocarburos en los suelos.

Conclusión

- ♣ La primera parte de la hipótesis no se cumplió debido a que los 5 grupos tróficos en general estuvieron presentes en ambos suelos (SC y SNC), sin embargo, los omnívoros y depredadores estuvieron ausentes tanto en el SC de la zona desnuda como en el SNC de la zona de raíces, lo cual confirma que la zona de raíces fue más importante en el SC, debido a que esta zona jugó el papel de refugio y de un punto caliente de actividad biológica para los nemátodos. La segunda parte de la hipótesis se cumplió debido a que la abundancia de los nemátodos bacterívoros se mantuvo alta en el SC, ya que éstos se vieron favorecidos por la presencia de la raíces de *Stipa sp.* y por el aumento de la MO que fue causada por el combustóleo.

- ❖ **Apéndice 1.** Tablas de los análisis estadísticos realizados en los diferentes parámetros fisicoquímicos e índices ecológicos.

Prueba de *t*

	valor <i>t</i>	Valor crítico
Humedad (HS)	1.45	4.303
Materia orgánica (MO)	10.28	4.303

Prueba de chi-cuadrada

Abundancia de nematodos (T nem)

	Con raíz	Sin raíz	Totales por fila
Suelo contaminado	384	35	419
Suelo no contaminado	23	29	52
Totales por columna	407	64	471
Valores esperados	362.06	56.93	
	44.93	7.06	

Valor Chi-cuadrado = 88.64

Valor crítico = 3.84

Estructura trófica

	Fitófagos	fungívoros	Bacterívoros	Predadores	Omnívoros	Totales por fila
Suelo contaminado	91	57	263	3	6	420
Suelo no contaminado	23	19	10	1	1	54
Totales por columna	114	76	273	4	7	474
Valores esperados	101.01	67.34	241.89	3.54	6.2	
	12.98	8.65	31.1	0.45	0.79	

Valor Chi-cuadrado = 39.63

Valor crítico = 9.4

Índice de Shannon-Weaner (H')

	Con raíz	Sin raíz	Totales por fila
Suelo contaminado	1.75	0.78	2.53
Suelo no contaminado	1.27	0.89	2.16
Totales por columna	3.02	1.67	4.69
Valores esperados	1.62	0.9	
	3.02	0.76	

Valor de Chi-cuadrada = 0.05

Valor crítico = 3.84

Índice de madurez (IM)

	Con raíz	Sin raíz	Totales por fila
Suelo contaminado	2.15	1.86	4.01
Suelo no contaminado	2.09	2.1	4.19
Totales por columna	4.24	3.96	8.2
Valores esperados	2.07	1.93	
	2.16	2.02	

Valor Chi-cuadrado = 0.01

Valor crítico = 3.84

Diversidad trófica (T)

	Con raíz	Sin raíz	Totales por fila
Suelo contaminado	2.30	1.25	3.54
Suelo no contaminado	2.57	3.21	5.78
Totales por columna	4.88	4.46	9.32
Valores esperados	1.85	1.69	
	3.02	2.76	

Valor Chi-cuadrado = 0.36

Valor crítico = 3.84

Relación H/B

	Con raíz	Sin raíz	Totales por fila
Suelo contaminado	0.23	0.06	0.29
Suelo no contaminado	2	1.83	3.83
Totales por columna	2.23	1.89	4.12
Valores esperados	0.15	0.13	
	2.07	1.75	

Valor Chi-cuadrado = 0.08

Valor crítico = 3.84

Índice de Sørensen

Fórmula **QS=2C/A+B**

Donde **A** y **B** son el número de especies (en este caso fueron géneros) de las muestras **A** y **B** respectivamente, y **C** es el número de especies compartidas por las 2 muestras.

A=25 B=8 C=8

QS= 0.4848

- ❖ **Apéndice 2.** Fotografías de los nemátodos del suelo, así como las zonas donde se encontraron.

Acrobeles



SCZR
SCZD
SNCZR
SNCZD

Parte anterior



Parte posterior

Acrobelloides



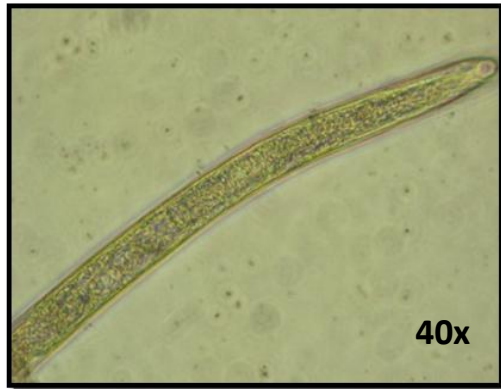
SCZR
SNCZD

Parte anterior



Parte posterior

Akrotonus



SCZR

Parte anterior



Parte posterior

Alaimus



SCZR

Parte anterior

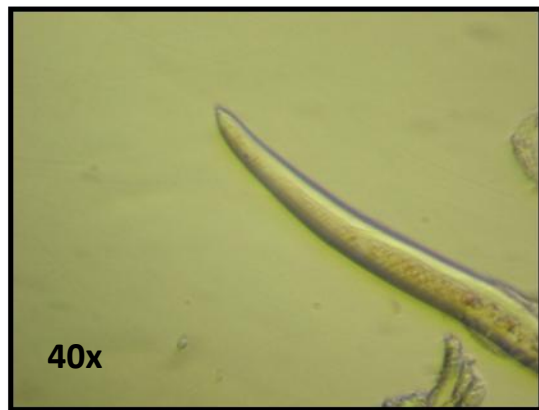


Parte posterior

Anguina



Parte anterior



SCZR

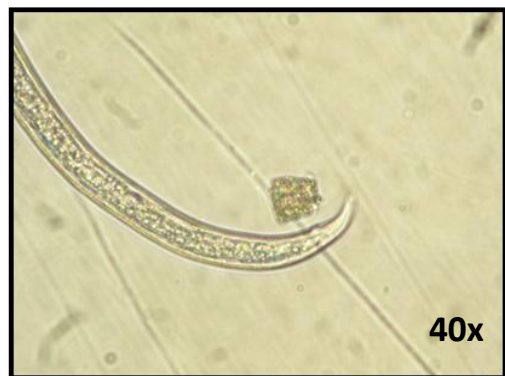
Parte posterior

Aphelenchoides



SCZR
SCZD
SNCZR
SNCZD

Parte anterior



Parte posterior

Aporcelaimus



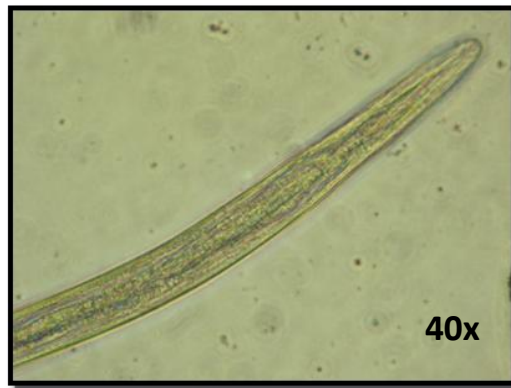
SCZR
SNCZD

Parte anterior



Parte posterior

Basiria



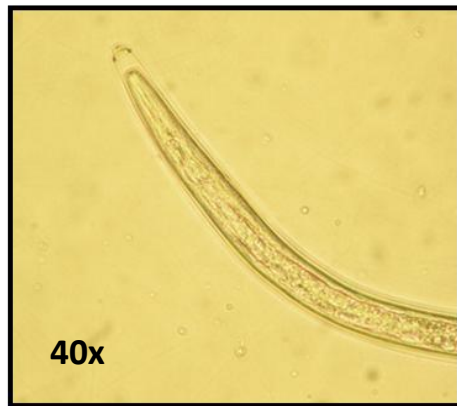
SCZR

Parte anterior



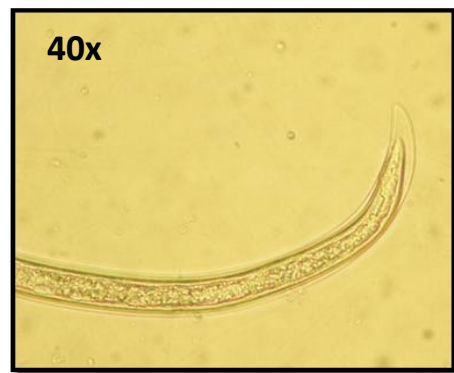
Parte posterior

Belondira



SCZR

Parte anterior



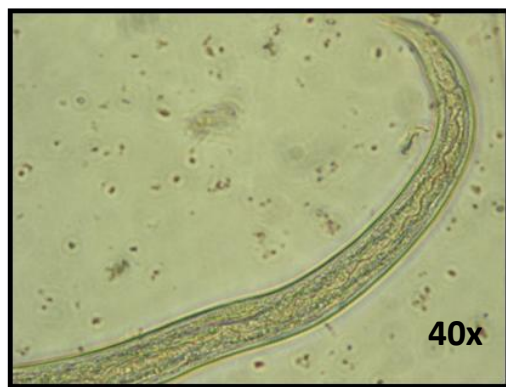
Parte posterior

Boleodorus



SCZR

Parte anterior



Parte posterior

Campydora



SCZR
SCZD

Parte anterior



Parte posterior

Cephalobus



Parte anterior



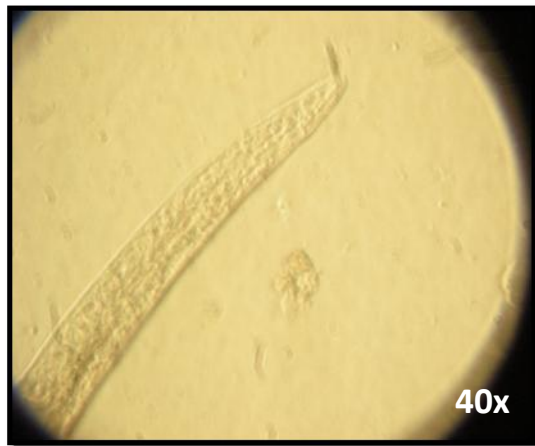
SCZR

Parte posterior

Cervidellus



Parte anterior



SCZR

Parte posterior

Ditylenchus



40x



SCZR
SNCZR
SNCZD

Parte anterior



Parte posterior

Doryllium



SCZR

Parte anterior



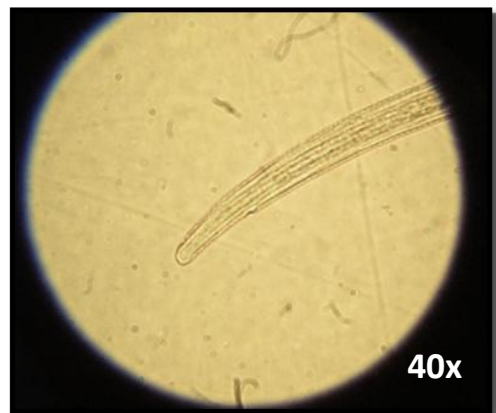
Parte posterior

Eucephalobus



SCZR

Parte anterior



Parte posterior

Eudorylaimus



SCZR

Parte anterior



Parte posterior

Filenchus



SCZR

Parte anterior



Parte posterior

Helicotylencus



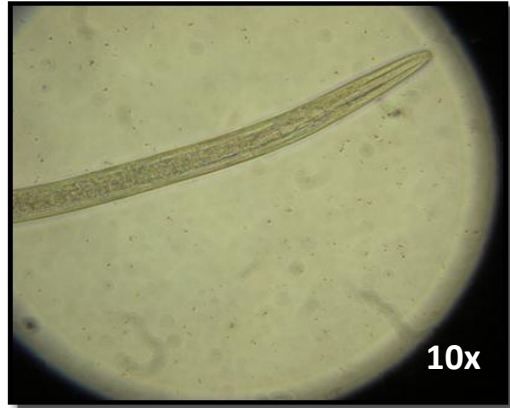
SCZR
SNCZR

Parte anterior



Parte posterior

Heterocephalobus



SCZR
SCZD

Parte anterior



Parte posterior

Hoplolaimus



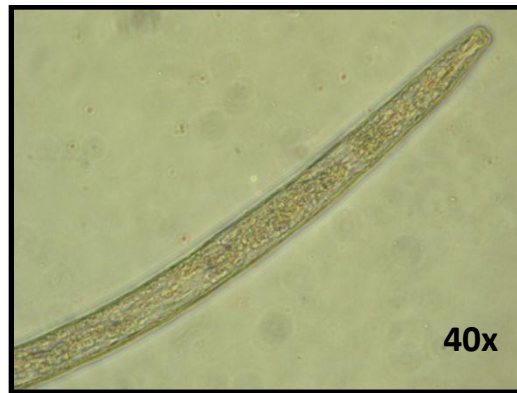
SCZR
SCZD

Parte anterior



Parte posterior

Longidorus



SCZR

Parte anterior



Parte posterior

Panagrolaimus



SCZR
SCZD
SNCZR

Parte anterior



Parte posterior

Pratylenchus



SCZR

Pungetus



SCZR

Parte anterior



Parte posterior

Bibliografía

- ❖ Aguilera N., 1989. Tratado de edafología de México. Tomo 1, Facultad de ciencias, UNAM, México, pp.222.
- ❖ Bardgett R., 2005. The Biology of Soil: A Community and Ecosystem Approach. Oxford University Press. USA. pp. 242.
- ❖ Bell G., 2007. The evolution of trophic structure. *Heredity*. 99: 494-505.
- ❖ Blakely J., Neher D. and Spongberg L., 2002. Soil invertebrate and microbial communities and decomposition as indicators of polycyclic aromatic hydrocarbon contamination. *Applied Soil Ecology*, 21: 71–88.
- ❖ Bongers T. and Bongers M., 1998. Functional diversity of nematodes. *Applied Soil Ecology*. 10:239–251.
- ❖ Bongers T. and Ferris H., 1999. Nematode community structure as a bioindicator in environmental monitoring. *TREE*, 14 (6): 224-228.
- ❖ Cardon Z. and Whitbeck J. (Eds), 2007. The rhizosphere: an ecological perspective. Elsevier Academic Press, USA, pp. 212.
- ❖ Carman K., Fleeger J., Means J., Pomarico S. and Mc Millin D., 1995. Experimental investigation of the effects of polynuclear aromatic hydrocarbons on an estuarine sediment food web. *Marine Environmental Research*. 40:289–318.
- ❖ Coleman D., Crossley D. and Hendrix P., 2004. Fundamentals of soil ecology. 2ª ed. Elsevier Academic Press, USA, pp. 386.
- ❖ De Goede and Bongers T., 1994. Nematode community structure in relation to soil and vegetation characteristics. *Applied Soil Ecology*. 1:29-44.
- ❖ Durán A., Cisneros A. and Vargas A., 2005. Bioestadística. 2ª Ed., UNAM, México, pp. 258.
- ❖ Erstfeld K. M. and Snow-Ashbrook J., 1999. Effects of chronic low-level PAHs contamination of soil invertebrate communities. *Chemosphere*. 39:2117–2139.
- ❖ Ferris H. and Bongers T., 2006. Nematode Indicators of Organic Enrichment. *Journal of Nematology* 38(1): 3–12.

- ❖ Ferris H., Bongers T. and De Goede R., 2001. A framework for soil food web diagnostics: extension of the nematode faunal analysis concept. *Applied Soil Ecology* 18: 13–29.
- ❖ Gaugler R. and Bilgrami A. (Eds.), 2004. *Nematode Behaviour*. CABI Publishing, UK, pp. 419.
- ❖ Gen C., Jie Q., Dazhong S., Yingmei Z. and Weihong J., 2009. Diversity of Soil Nematodes in Areas Polluted with Heavy Metals and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Lanzhou, China. *Environmental Management*, 44:163–172.
- ❖ Iniestra D.J, Mendoza A., López F., Soler A., and Hernández M., 2006. *Edafología: manual de métodos de análisis de suelo*, UNAM, pp. 82.
- ❖ Jairajpuri S. and Ahmad W., 1992. *Dorylaimida: Free-living, Predaceous and Plant-parasitic Nematodes*. E.J. Brill, India, pp. 458.
- ❖ Killham K., 1994. *Soil ecology*. Cambridge University Press, UK, pp. 242.
- ❖ Lynch J., Brimecombe M. and De Leij F., 2002. Rhizosphere. *Encyclopedia of life sciences*. Macmillan Publishers Ltd, Nature Publishing Group. www.els.net.
- ❖ Martínez V. and López F., 2001. Efectos de hidrocarburos en las propiedades físicas y químicas de suelo arcilloso *Terra* 19: 9-17.
- ❖ Plice M. J. 1948. Some effects of crude petroleum on soil fertility: *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 14: 413-416.
- ❖ Ritz K. and Trudgill D., 1999. Utility of nematode community analysis as an integrated measure of the functional state of soils: perspectives and challenges. *Plant and Soil* 212: 1–11.
- ❖ Sangabriel W., Ferrera R., Trejo D., Mendoza M. R., Cruz J. S., López C., Delgadillo J. and Alarcón A. 2006. Tolerancia y capacidad de fitorremediación de combustóleo en el suelo por seis especies vegetales. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 22 (2): 63-73.
- ❖ Singer M. and Munns D., 1992. *Soils: An introduction*. 2^a ed., Macmillan, Singapur, pp. 473.

- ❖ Tarradellas J., Britton G. and Rosell D., (Eds.), 1997. Soil ecotoxicology. Lewis Publishers CRC, USA, pp. 386.
- ❖ Volke T. and Velasco J.A., 2002. Tecnologías de remediación para suelos contaminados. INE-SEMARNAT, México, 64 pp.
- ❖ Wilson M. J. and Kakouli-Duarte T. (Eds.), 2009. Nematodes as environmental indicators. CABI. UK. pp. 326.
- ❖ <http://insects.tamu.edu/research/collection/hallan/Nematoda/Family/0NematodaIndex0.htm>.
- ❖ <http://www.inafed.gob.mx/work/templates/enciclo/veracruz/municipios/30086a.htm>.
- ❖ <http://nematode.unl.edu/konzlistbutt.htm>.
- ❖ <http://waterquality.montana.edu/docs/methane/Donlan.shtml>.