



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS TABASCO

POSTGRADO EN PRODUCCIÓN AGROALIMENTARIA EN EL TRÓPICO

ESTUDIO COMPARATIVO DE TRES ÉPOCAS DEL AÑO EN
CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS, PLANTAS Y ORGANISMOS DE SUELO
CONTAMINADO CON PETRÓLEO EN LA VENTA, TABASCO, MÉXICO

RODRIGO DORANTES AVELINO

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO

PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS

H. CÁRDENAS, TABASCO

DICIEMBRE, 2010

La presente tesis titulada: **Estudio comparativo de tres épocas del año en características químicas, plantas y organismos del suelo contaminado con petróleo en La Venta, Tabasco, México**, realizada por el alumno Rodrigo Dorantes Avelino, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN PRODUCCIÓN AGROALIMENTARIA EN EL TRÓPICO

CONSEJO PARTICULAR

Consejera de tesis:



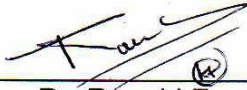
Dra. María del Carmen Rivera Cruz

Asesor:



Dr. Lorenzo Armando Aceves Navarro

Asesor:



Dr. Ronald Ferrera Cerrato

Asesor:



Dr. Saúl Sánchez Soto

H. Cárdenas, Tabasco, México, 13 de diciembre de 2010

La presente tesis titulada **“Estudio comparativo de tres épocas del año en características químicas, plantas y organismos del suelo contaminado con petróleo en La Venta, Tabasco, México”**, fue dirigida por la Dra. María del Carmen Rivera Cruz, Profesor Investigador del Colegio de Postgraduados Campus Tabasco.

Este estudio fue financiado con recursos del proyecto de Fondos Mixtos CONACYT-Tabasco TAB-2009-C18-122174 “Desarrollo de modelo ecotoxicológico como alternativa de evaluación de la restauración de suelos contaminados con petróleo”, y parcialmente por recursos propios del Campus-Tabasco y línea 8 de investigación del Colegio de Postgraduados Impacto y mitigación del cambio climático: Sector Agrícola y Forestal.

ESTUDIO COMPARATIVO DE TRES ÉPOCAS DEL AÑO EN
CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS, PLANTAS Y ORGANISMOS DE SUELO
CONTAMINADO CON PETRÓLEO EN LA VENTA, TABASCO, MÉXICO

Rodrigo Dorantes Avelino, MC

Colegio de Postgraduados, 2010

En esta investigación el objetivo fue evaluar las propiedades físicas, químicas y biológicas en un suelo Agrícola y Pecuario para un día específico en tres épocas del año, así como el efecto de los hidrocarburos del petróleo y acumulación de precipitación en el ejido José Narciso Roviroso, Huimanguillo, Tabasco. El sitio seleccionado es un área de 44,321.199 m² ubicada al sureste del Complejo Procesador de Gas La Venta, el suelo es receptor de petróleo crudo desde hace 20 años y fue descontaminado en abril 2002. Se establecieron (de agosto 2009 a abril 2010) nueve puntos (2x2 m) experimentales distribuidos completamente al azar. Se realizaron tres muestreos (30 de septiembre del 2009, 30 de enero y 30 de abril del 2010). Se determinó; la acumulación de precipitación regional, por punto de muestreo y área total la textura, pH, C org, N total, P disponible, contenido de HTP, la cobertura, diversidad, biomasa aérea vegetal, macrofauna y microflora rizosférica (BFN, BSP, BSK y HH) en suelo. El análisis estadístico para las variables respuesta por punto de muestreo y área total fue el análisis de varianza y comparación de medias (Tukey, $p \leq 0.05$), mediante el procedimiento GLM del paquete estadístico Statistical Analysis System. Los resultados evidencian diferencias significativas ($p \leq 0.05$) de las variables respuesta entre puntos, el C org disminuyó en siete puntos de los nueve evaluados el día del muestreo en época de nortes. Los contenidos de HTP de los nueve puntos en las tres épocas de muestreo rebasan los límites máximos permisibles para la fracción mediana (1,200 mg kg⁻¹ s.s.) y pesada (3,000 mg kg⁻¹ s.s.) en suelo de uso agrícola. La diversidad y producción de biomasa aérea vegetal fue menor en siete puntos para el día de muestreo en época de seca. Las BFN, BSP, BSK fueron mayor en todos los puntos, el día de muestreo en época de lluvias y los HH aumentaron en el P8 y P9 para las tres épocas de muestreo. Se encontró en las tres épocas que el C org, N total, P disponible, biomasa aérea vegetal y poblaciones de BFN, BSP, BSH y HH, fueron afectados por la acumulación de precipitación e hidrocarburos del petróleo, sin embargo macrofauna solo se relaciona directamente con la acumulación de precipitación en el sitio. Se determinó que las nueve variables anteriores tienen potencial de uso como indicadores de contaminación con petróleo y/o condiciones de acumulación de agua en el suelo.

Palabras claves: bacterias, biomasa aérea, hongos, hidrocarburos, precipitación.

COMPARATIVE STUDY OF THREE SEASONS THE YEAR IN CHEMICAL
CHARACTERISTICS, PLANTS, AND ORGANISMS OF SOIL CONTAMINATED
WITH OIL IN LA VENTA, TABASCO, MEXICO

Rodrigo Dorantes Avelino, MC

Colegio de Postgraduados, 2010

The objective of this investigation was to evaluate the physical, chemical and biological properties soil of agriculture and livestock for a specific day in three seasons and to note the effect of petroleum hydrocarbons and accumulation of rainfall in the common land José Narciso Rovirosa Huimanguillo, Tabasco. The selected site is an area of 44,321.199 m² located southeast of the Gas Processing Complex La Venta. The soil has been the recipient of crude oil for 20 years and was decontaminated in April 2002. Nine experimental points (2x2 m) were established August 2009 to April 2010 distributed completely at random. There were three samples taken (September 30, 2009, January 30 and April 30, 2010). The accumulation of regional precipitation, the point of sampling and the total area, texture, pH, C org, total N, available P, HTP content, coverage, diversity, plant biomass, macrofauna and rhizosphere microflora (BFN, BSP, BSK and HH) in soil were determined. Statistical analysis for response variables and area sampling point total was the analysis of variance and means comparisons (Tukey, $p \leq 0.05$), using the GLM procedure of Statistical Analysis System. The results showed significant differences ($p \leq 0.05$) amongst the response variables between points. The C org decreased by seven points out of nine was evaluated the day of sampling in the windy season. HTP content of the nine points in the three sampling periods went beyond the maximum permissible limits for the middle fraction (1,200 mg kg⁻¹ s.s.) and heavy (3,000 mg kg⁻¹ s.s.) in soil for agricultural use. The diversity and plant biomass production was lower by seven points on the sampling day during the dry season. The BFN, BSP, BSK were higher at all points on the day of sampling in the rainy season and increased HH the P8 and P9 for the three sampling periods. It was found all three times that the C org, total N, available P, plant biomass and populations of BFN, BSP, BSK and HH, were affected by the accumulation of precipitation and petroleum hydrocarbons, however this only relates directly to macrofauna with the accumulation of precipitation at the site. It was determined that the nine variables have potential use as indicators of oil-contamination and / or conditions of accumulation of water in the soil.

Palabras claves: bacteria, biomass, fungi, hydrocarbons, precipitation.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el financiamiento otorgado para realizar los estudios de Maestría en Ciencias en Producción Agroalimentaria en el Trópico.

Al Sr. Pascual Corzo (†), y familia, quienes amablemente me permitieron establecer los puntos de muestreo en su terreno. Gracias, a Onésimo, Lázaro y Abel por su ayuda durante la colecta de muestras.

Al Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas, especialmente a la Dra. María del Carmen Rivera Cruz profesora e investigadora, encargada del laboratorio de Microbiología del Suelo, por su colaboración, paciencia, apoyo, dedicación, y por impulsarme a que lograra la culminación de este objetivo que me propuse en enero del 2009. Gracias de nuevo por permitirme ser su estudiante de tiempo completo.

Al Dr. Lorenzo Armando Aceves Navarro por las sugerencias realizadas y por enseñarme a respaldar científicamente lo que se encuentra en este documento de tesis.

Al Dr. Ronald Ferrera Cerrato por enriquecer mi desarrollo profesional en base a su amplia experiencia en Microbiología del Suelo, por sus acertadas correcciones, sugeridas este documento de tesis.

Al Dr. Saúl Sánchez Soto por sus valiosas contribuciones realizadas a la presente investigación, y por su ayuda en la revisión de la clasificación de la macrofauna.

Al M.C. Antonio Trujillo Narcía, quien con sus sabios consejos me ha permitido visualizar nuevos horizontes en el ámbito profesional y sobre todo por esa gran amistad que me ha brindado, gracias por sus palabras que más y más me motivan a seguirme superando.

A mis amigos del laboratorio, Ing. Apolinar González Mancilla, que próximamente también será Maestro en Ciencias; a los estudiantes de Ingeniería Química, Gaby, Oscar, Aquilino y Maricela; a los estudiantes de Químico Fármaco biólogo, María Elizabeth, Román, Viry y Lupita. No voy a olvidar sus enseñanzas y ayuda durante el lapso de mi tesis.

Dedico esta tesis a:

Mis padres: Rosario Dorantes Escobedo y Genoveva Avelino García, así como mis hermanos José Luis, Leticia y Ángeles.

Quienes de manera incondicional me han brindado su comprensión y sabios consejos que me han orientado hacia el camino recto de la vida. Por que siempre hemos compartido tristezas y alegrías, éxitos y fracasos, y por mantenernos unidos, ayudándome al logro de una meta más. Siempre están y estarán en mi pensamiento.

CONTENIDO

	Pág.
LISTA DE CUADROS	xi
LISTA DE FIGURAS	xiii
ABREVIATURAS Y DEFINICIONES	xv
SECCIÓN I. INTRODUCCIÓN	1
SECCIÓN II. OBJETIVOS	4
2.1. Objetivo general	4
2.2. Objetivos particulares	4
SECCIÓN III. HIPÓTESIS	5
3.1. Hipótesis general.....	5
3.2. Hipótesis particulares	5
SECCIÓN IV. REVISIÓN DE LITERATURA	6
4.1. Ecosistema <i>versus</i> agroecosistema	6
4.2. Definición operativa de agroecosistema	8
4.3. Factores ambientales e industriales que afectan al agroecosistema del trópico húmedo.....	9
4.3.1. Factores ambientales	10
4.3.2. Factores industriales	11
4.4. El suelo y los efectos de los hidrocarburos del petróleo	12
4.4.1. Efectos en las propiedades físicas del suelo	14
4.4.1.1. Contenido de humedad	14
4.4.1.2. Textura	15
4.4.2. Efecto en las propiedades químicas del suelo	16
4.4.2.1. Potencial hidrogeno.....	16
4.4.2.2. Materia orgánica y carbono orgánico	17
4.4.2.3. Nitrógeno total	18
4.4.2.4. Fósforo disponible	19
4.4.3. Efectos en organismos vivos del suelo.....	20
4.4.3.1. Macrofauna	21
4.4.3.2. Microflora.....	22
4.4.3.2.1. Bacterias fijadoras de nitrógeno	23
4.4.3.2.2. Bacterias solubilizadoras de fosfatos	24
4.4.3.2.3. Bacterias solubilizadoras de potasio	25
4.4.3.2.4. Hongos heterótrofos	26
4.5. Efectos del petróleo en las plantas.....	26
SECCIÓN V. MATERIALES Y MÉTODO	32
5.1. Trabajo de campo.....	32
5.1.1. Selección de suelos.....	32
5.1.2. Establecimiento de puntos de muestreo	36
5.2. Colecta de plantas-suelos-rizósfera	38
5.2.1. Colecta de plantas.....	38
5.2.2. Colecta de suelo.....	38
5.2.3. Colecta de rizósfera.....	39
5.3. Análisis de laboratorio	41
5.3.1. Análisis físicos y químicos del suelo.....	41
5.3.1.1. Textura	41

	Pág.	
5.3.1.2.	Potencial hidrógeno.....	42
5.3.1.3.	Materia orgánica y carbón orgánico	42
5.3.1.4.	Nitrógeno total	42
5.3.1.5.	Fósforo total	43
5.3.1.6.	Extracción y cuantificación de los hidrocarburos totales del petróleo	44
5.3.2.	Organismos del suelo y rizósfera	44
5.3.2.1.	Macrofauna	44
5.3.2.2.	Microflora.....	45
5.3.3.	Análisis en plantas.....	46
5.3.3.1.	Biomasa aérea seca y cobertura vegetal	46
5.3.3.2.	Índice de Simpson	47
5.3.3.3.	Identificación taxonómica	47
5.4.	Análisis matemático y estadístico.....	48
SECCIÓN VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN		49
Capítulo I. Variables meteorológicas durante el período de estudio		49
6.1.1.	Acumulación de precipitación y temperatura en época de lluvias	49
6.1.2.	Acumulación de precipitación y temperatura en época de nortes	50
6.1.3.	Acumulación de precipitación y temperatura en época de seca.....	51
Capítulo II. Estado actual de variables respuesta en nueve puntos de muestreo para un día específico de cada época del año		53
6.2.1.	Partículas del suelo y clase de textura	53
6.2.2.	Potencial hidrógeno.....	57
6.2.3.	Carbono orgánico	59
6.2.4.	Nitrógeno total	62
6.2.5.	Fósforo disponible	64
6.2.6.	Hidrocarburos totales del petróleo.....	66
6.2.7.	Las plantas del suelo.....	69
6.2.7.1.	Época de lluvias (30 de septiembre de 2009)	69
6.2.7.2.	Época de nortes (30 de enero de 2010)	70
6.2.7.3.	Época de seca (30 de abril de 2010).....	71
6.2.8.	La macrofauna del suelo	72
6.2.9.	La microflora del suelo a distancia y suelo rizosférico de plantas.....	74
6.2.9.1.	Poblaciones de bacterias en época de lluvias (30 de septiembre de 2009).....	74
6.2.9.2.	Poblaciones de hongos heterótrofos en época de lluvias (30 de septiembre de 2009).....	75
6.2.9.3.	Poblaciones de bacterias en época de nortes (30 de enero de 2010)	76
6.2.9.4.	Poblaciones de hongos heterótrofos en época de nortes (30 de enero de 2010)	77

6.2.9.5.	Poblaciones de bacterias en época de seca (30 de abril de 2010)	78
6.2.9.6.	Poblaciones de hongos heterótrofos en época de seca (30 de abril de 2010).....	79
6.2.9.7.	Efecto rizósfera de bacterias y hongos para un día específico en cada época del año	79
6.2.10.	La microflora del suelo a distancia y suelo rizosférico por especie vegetal para un día específico para cada época del año.	81
6.2.10.1.	Poblaciones de bacterias y hongos heterótrofos en suelo a distancia y suelo rizosférico por especie vegetal en época de lluvia (30 de septiembre de 2009)	81
6.2.10.2.	Poblaciones de bacterias y hongos heterótrofos en suelo a distancia y suelo rizosférico por especie vegetal en época de nortes (30 de enero de 2010)	83
6.2.10.3.	Poblaciones de bacterias y hongos heterótrofos en suelo a distancia y suelo rizosférico por especie vegetal en época de seca (30 de abril de 2010)	85
Capítulo III. Estado actual y relación entre AP e HTP en el área evaluada para un día específico de cada época del año		88
6.3.1.	Relación de variables respuesta con la presencia de AP	88
6.3.1.1.	Nitrógeno total	88
6.3.1.2.	Fósforo disponible	89
6.3.1.3.	Hidrocarburos totales del petróleo.....	90
6.3.1.4.	Biomasa aérea vegetal.....	92
6.3.1.5.	Macrofauna	93
6.3.1.6.	Poblaciones de bacterias y hongos	94
6.3.2.	Relación de variables respuesta con la presencia de HTP	98
6.3.2.1.	Carbono orgánico	98
6.3.2.2.	Nitrógeno total	98
6.3.2.3.	Fósforo disponible	99
6.3.2.4.	Biomasa aérea vegetal.....	100
6.3.2.5.	Poblaciones de bacterias y hongos	101
6.4.	Correlación entre variables respuesta para un día específico en cada época del año.	106
6.4.1.	Época de lluvias (30 de septiembre de 2009)	106
6.4.2.	Época de nortes (30 de enero de 2010)	107
6.4.3.	Época de seca (30 de abril de 2010).....	108
SECCIÓN VII. CONCLUSIONES		109
SECCIÓN VIII. LITERATURA CITADA		114
SECCIÓN IX. APÉNDICE		131
A1.	Análisis de varianza de variables respuesta en época de lluvias (30 de septiembre de 2009).....	131
A2.	Análisis de varianza de variables respuesta en época de nortes (30 de enero de 2010)	136
A3.	Análisis de varianza de variables respuesta en época de seca (30 de abril de 2010).....	141

LISTA DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 1. Composición media aproximada en volumen y peso de un suelo superficial.....	13
Cuadro 2. Interpretación de valores de pH.	17
Cuadro 3. Grupos más importantes de organismos presentes en el suelo.....	21
Cuadro 4. Especies vegetales presentes en cada época del año.....	47
Cuadro 5. Partículas de suelo y clase de textura de nueve puntos de muestreo para un día específico por época del año.....	57
Cuadro 6. Variación de las partículas del suelo por punto de muestreo para un día específico de cada época del año.	58
Cuadro 7. Efecto comparativo de pH y C org en suelo de los nueve puntos para un día específico de tres épocas del año.	62
Cuadro 8. Contenidos de nitrógeno total y fósforo disponible por punto de muestreo para un día específico de cada época del año.	64
Cuadro 9. Concentración de hidrocarburos totales del petróleo por punto de muestreo para un día específico de tres épocas del año.	68
Cuadro 10. Biomasa aérea seca total, cobertura y diversidad de especies en puntos de muestreo contaminados con hidrocarburos del petróleo.....	72
Cuadro 11. Total de individuos por grupo de macrofauna correspondientes a cada punto de muestreo para un día específico por época del año.....	74
Cuadro 12. Poblaciones de bacterias en suelo a distancia y suelo rizosférico por punto de muestreo para un día específico en cada época del año.	76
Cuadro 13. Efecto rizósfera de bacterias y hongos por punto de muestreo para un día específico de tres épocas del año.	80
Cuadro 14. Efecto rizósfera y poblaciones de BFN, BSP y BSK en suelo a distancia y suelo rizosférico por especie vegetal para un día específico de la época de lluvia.	82
Cuadro 15. Efecto rizósfera y poblaciones de BFN, BSP y BSK en suelo a distancia y suelo rizosférico por especie vegetal para un día específico de la época de nortes.	84
Cuadro 16. Efecto rizósfera y poblaciones de BFN, BSP y BSK en suelo a distancia y suelo rizosférico por especie vegetal para un día específico en la época de seca.	86
Cuadro 17. Efecto rizósfera y poblaciones de hongos heterótrofos en suelo a distancia y suelo rizosférico por especie vegetal para un día específico de tres épocas del año.....	86
Cuadro 18. Efecto del DM por época del año sobre el número de especies vegetales y producción de biomasa aérea seca en toda la superficie evaluada.....	93

	Pág.
Cuadro 19. Correlación de variables para un día específico en época de lluvias.	106
Cuadro 20. Correlación de variables para un día específico en época de nortes.	107
Cuadro 21. Correlación de variables para un día específico en época de seca.....	108

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Elementos y factores del ecosistema.	7
Figura 2. Partícula del suelo que muestra la distribución de las microcolonias bacterianas, agua, minerales y aire dentro de los poros.	12
Figura 3. Triangulo de textura del suelo.	15
Figura 4. Forma de las raíces: a) extenso b) pivotante y c) fasciculada.....	29
Figura 5. Regiones que forman la rizósfera.....	30
Figura 6. Flujograma de la investigación.	34
Figura 7. Ubicación del sitio de muestreo.....	35
Figura 8. Panorámica del sitio de estudio. a) Vista general del área evaluada. b) Situación actual del suelo contaminado con hidrocarburos del petróleo. c) Estado actual de corrosión que presenta los ductos. d) Caseta de protección catódica.	36
Figura 9. Delimitación de los puntos de muestreo con malla borreguera.....	37
Figura 10. Ubicación de puntos de muestreo el ejido José Narciso Rovirosa, La Venta, Huimanguillo, Tabasco.	40
Figura 11. Comportamiento diario de la AP y la temperatura media mensual en la época de lluvias.....	50
Figura 12. Comportamiento diario de la AP y la temperatura media mensual en la época de nortes.....	51
Figura 13. Comportamiento diario de la AP y la temperatura media mensual en la época de seca.....	52
Figura 14. Panorámica del sitio de estudio el día: a) 30 de septiembre de 2009 (época de lluvia), b) 30 de enero de 2010 (época de nortes) y c) 30 de abril de 2010 (época de seca).	54
Figura 15. Potencial hidrógeno de los puntos de muestreo para un día específico de cada época del año.	60
Figura 16. Poblaciones de hongos heterótrofos en suelo a distancia y suelo rizosférico en cada punto por época del año; a) lluvia, b) nortes y c) seca.	80
Figura 17. Efecto de la AP sobre el contenido de N total para un día específico de cada época del año.	89
Figura 18. Efecto de la AP sobre el contenido de P disponible para un día específico de cada época del año.	90
Figura 19. Efecto de la AP sobre el contenido de HTP para un día específico de cada época del año.	92
Figura 20. Efecto de la AP sobre la producción de biomasa aérea seca para un día específico para cada época del año.....	94
Figura 21. Efecto de la AP sobre la abundancia de la macrofauna para un día específico de cada época del año.	95

	Pág.
Figura 22. Efecto de la AP sobre las poblaciones de: a) BFN, b) BSP, c) BSK y d) HH, en suelo a distancia y suelo rizosférico para un día específico de cada época del año.	96
Figura 23. Efecto de los HTP sobre el contenido de carbono orgánico para un día específico de cada época del año.	99
Figura 24. Efecto de los HTP sobre el contenido N total para un día específico de cada época del año.	100
Figura 25. Efecto de los HTP sobre el contenido P disponible para un día específico de cada época del año.	101
Figura 26. Efecto de los HTP sobre la producción de biomasa aérea vegetal para un día específico de cada época del año.....	102
Figura 27. Efecto de los HTP sobre las poblaciones de: a) BFN, b) BSP, c) BSK y d) HH, en suelo a distancia y suelo rizosférico para un día específico de cada época del año.	104

ABREVIATURAS Y DEFINICIONES

A1	Apéndice 1
A2	Apéndice 2
A3	Apéndice 3
AP	Acumulación de Precipitación
BFN	Bacterias Fijadoras de Nitrógeno de Vida Libre
BSP	Bacterias Solubilizadoras de Fosfatos
BSK	Bacterias Solubilizadoras de Potasio
cm	centímetro
C org	Carbono orgánico
DM	Día de Muestreo
g	gramo
h	horas
HH	Hongos Heterótrofos
HTP	Hidrocarburos Totales del Petróleo
kg	kilogramo
mg	miligramo
mL	mililitro
mm	milímetro
N	Nitrógeno
P	Fósforo
pH	potencial hidrógeno
s	segundo
s.r.	suelo rizosférico
s.s.	suelo seco
UFC	Unidades Formadoras de Colonias
°C	grado centígrado

SECCIÓN I. INTRODUCCIÓN

Los hidrocarburos son un grupo orgánico que se clasifican en biogénicos y petrogénicos (Wang *et al.*, 2009). Los petrogénicos han sido detectados en suelos de regiones petroleras de Argentina, China, Ecuador, Venezuela y México en contenidos superiores a los límites máximos permisibles establecidos por la normatividad vigente de cada país (Fernández *et al.*, 2002; Ortínez *et al.*, 2003; Brandt *et al.*, 2006; Qu *et al.*, 2007; Barragán *et al.*, 2008; Arias *et al.*, 2010). Las causas de esta contaminación son generadas por volcadura de vehículos y ruptura de oleoductos que conducen petróleo crudo del pozo de extracción a las baterías de separación y refinerías (Iturbe *et al.*, 2004; Singh y Ward, 2004; Obayori *et al.*, 2008).

En México, durante el año 2009, PEMEX (2010) reportó 216 fugas y derrames de petróleo al suelo con un equivalente a 7,033 toneladas. En particular en el estado de Tabasco para el mismo año se reportaron 29 emergencias ambientales, las cuales incluye una fuga, 25 derrames y tres incendios, generados 19 en plantas fijas y 10 durante el transporte (Anónimo, 2009a), lo anterior induce que los suelos de diferentes sitios aledaños a los ductos, pozos de perforación y refinerías se reporten con hidrocarburos derivados del petróleo (Iturbe *et al.*, 2004; Zavala-Cruz *et al.*, 2005; Hernández-Acosta *et al.*, 2006).

Los suelos contaminados del estado de Tabasco (Gutiérrez y Zavala, 2001; García-López *et al.*, 2006) están expuestos a factores ambientales naturales extremos como son: las altas precipitaciones anuales (990 a 3000 mm) (USDA, 2006), desbordamiento de cuerpos de agua (ríos y lagunas) y escasez de humedad en el suelo. Factores que inducen situaciones de inundación y sequías marcadas (Moreno *et al.*, 2002; Anónimo, 2009b).

La contaminación del suelo con petróleo crudo y la presencia de eventos climatológicos en las diferentes épocas del año afectan la diversidad y productividad de las plantas, así como la vida microscópica en el suelo (Menghi y Herrera, 1998; Rivera-Cruz *et al.*, 2004; Adams *et al.*, 2008). Los eventos climatológicos, principalmente las altas precipitaciones provocan el desbordamiento y movimiento de los hidrocarburos del petróleo contaminando zonas aledañas, cuerpos de agua y ecosistemas naturales (Anónimo, 2007).

Los hidrocarburos del petróleo en el suelo resultan tóxicos para los organismos, al respecto, Rivera-Cruz y Trujillo-Narcía (2004) dentro de la época de lluvias, evaluaron un suelo agrícola y pecuario con $79,457 \text{ mg kg}^{-1}$ de hidrocarburos totales del petróleo y encontraron una inhibición del crecimiento vegetativo, un aumento en la diversidad vegetal y una reducción en la biomasa vegetal de pastos (*Echinochloa polystachya* y *Brachiaria mutica*) y de ciperáceas (*Cyperus* spp.). Por otra parte, Ogbo *et al.* (2009) al relacionar los diferentes niveles de petróleo crudo con la planta *Paspalum scrobiculatum*, indicaron que el crecimiento de la planta se redujo, así como el peso de la biomasa aérea.

En el suelo pueden afectar la salud de los organismos vivos (Escalante-Espinosa *et al.*, 2005), en particular, las poblaciones de bacterias benéficas para el crecimiento de las plantas, hongos heterótrofos (Rivera-Cruz *et al.*, 2004; Brzezinska *et al.*, 2008) y bacterias fijadoras de nitrógeno atmosférico de vida libre, las cuales aumentan por efecto de los contenidos de hidrocarburos del petróleo en el suelo (García, 1999; Hernández-Acosta *et al.*, 2006; Obayori *et al.*, 2008). Al igual que los hidrocarburos del petróleo, la precipitación pluvial en el trópico húmedo mexicano es sumamente irregular lo que induce cambios en la vegetación y los organismos del suelo (Vásquez, 2002) en periodos del año que distinguen en esta zona como las épocas de lluvias, nortes y secas que se presentan de manera cíclica (De Dios, 2001).

Debido a la importancia económica y social que tiene la productividad de las praderas en el trópico húmedo en diferentes épocas del año, la presente investigación surge de la necesidad de evaluar el nivel de impacto actual de la industria petrolera y de la acumulación de precipitación en tres épocas del año para una pradera de uso agrícola – pecuario, basado en los siguientes objetivos e hipótesis.

SECCIÓN II. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Evaluar las propiedades físicas, químicas y biológicas en un suelo Agrícola y Pecuario para un día específico en tres épocas del año, así como el efecto de los hidrocarburos del petróleo y acumulación de precipitación en el ejido José Narciso Roviroso, Huimanguillo, Tabasco, con el fin de proponer indicadores de alteración representativos de una llanura aluvial baja.

2.2. Objetivos particulares

1. Evaluar los contenidos de hidrocarburos del petróleo, textura y potencial hidrógeno del suelo en nueve puntos de muestreo para un día específico de tres épocas del año.
2. Determinar el efecto de la acumulación de precipitación y los contenidos de HTP para un día específico por época del año sobre las propiedades químicas del suelo y la vegetación por puntos de muestreo y área total.
3. Cuantificar y clasificar a la macrofauna del suelo presente en cada punto de muestreo, así como su efecto con la acumulación de precipitación para un día específico en tres épocas del año.
4. Estimar para un día específico por época del año, las poblaciones de microflora de suelo y rizósfera de las especies vegetales, por punto y por área de muestreo y su efecto con la acumulación de precipitación e hidrocarburos del petróleo.

SECCIÓN III. HIPÓTESIS

3.1. Hipótesis general

Las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo en un día específico de tres épocas del año son afectadas por los contenidos de hidrocarburos del petróleo y acumulación de precipitación, lo que induce su sensibilidad para presentar indicadores de característicos de la llanura aluvial baja

3.2. Hipótesis particulares

1. El contenido de hidrocarburos del petróleo, la textura y el potencial hidrógeno del suelo por punto son mayores para el muestreo en época de lluvias y nortes que el día de muestreo en época de seca.
2. Las propiedades químicas del suelo y la vegetación por punto de muestreo y área de muestreo con diferente acumulación de precipitación y contenido de HTP son menores para el muestreo en época de secas que el muestreo en época de lluvias y nortes.
3. La macrofauna del suelo en los nueve puntos con diferente acumulación de precipitación disminuye para el día de muestreo en época de lluvias y nortes que el día de muestreo en época de seca.
4. Las poblaciones de microflora en suelo y rizósfera de las especies vegetales en nueve puntos y área de muestreo son menores en época de seca en suelos con diferente contenido de hidrocarburos del petróleo y acumulación de precipitación.

SECCIÓN IV. REVISIÓN DE LITERATURA

4.1. Ecosistema *versus* agroecosistema

Un ecosistema es un sistema biológico formado por un conjunto de organismos que viven juntos en la biosfera, presentan cierta homogeneidad topográfica, climática, pedológica, botánica y zoológica (Dajoz y Leiva, 2003). El ecosistema comprende a todos los seres vivos y a los no vivos de un lugar, además, incluye los movimiento de energía y materia que fluyen a través de ellos. Para describir la diversidad se utilizan principalmente dos elementos: el número de especies y el número de individuos que tiene cada especie (Chediack, 2009).

Otra forma de analizar al ecosistema es mediante los elementos estructurales y elementos funcionales, considerando a los elementos estructurales como los factores abióticos denominados unidades básicas, entre las que se encuentran las sustancias químicas, la energía, la luz y el calor. De igual manera, se presentan los factores bióticos, que se agrupan en unidades tales como: organismos autótrofos, organismos consumidores y organismos depredadores. Es por ello que cualquier ecosistema se debe de analizar en función de la estructura y sus unidades básicas como se representa en la Figura 1 (López, 2006).

Entre tanto, el agroecosistema se define como un ecosistema manipulado y alterado por el ser humano con el propósito de producir alimentos. Al igual que el ecosistema el agroecosistema incluye los factores bióticos y abióticos con sus unidades respectivas como se muestra en la Figura 1 (Rivera, 2007). El ecosistema tiene como objetivo la conservación de la diversidad y los servicios ambientales, mientras que en el agroecosistema el objetivo es el establecimiento de sistemas de producción intensivos en el que el hombre interviene con un plan de manejo que modifica los ciclos de los materiales de manera transitoria y permanente (Gliessman, 2002), pero la calidad del suelo determina la sustentabilidad y productividad del agroecosistema (Meleró *et al.*, 2007).

En el agroecosistema, los organismos productores incluyen a plantas (árboles, arbustos perennes y cultivos de ciclo corto), algas y cianobacterias que son autónomos, estos producen sus propios alimentos e interactúan con los elementos abióticos como luz, agua, calor y nutrimentos para sostenerse y desarrollarse (Malagón y Prager, 2001). En cambio, los organismos consumidores son heterótrofos, entre estos se encuentra el hombre quien interactúa con organismos productores, consumidores, desintegradores y elementos abióticos, pero tan solo los organismos desintegradores y mineralizadores proporcionan elementos orgánicos y minerales a los organismos productores y consumidores (Fernández y Leiva, 2003).

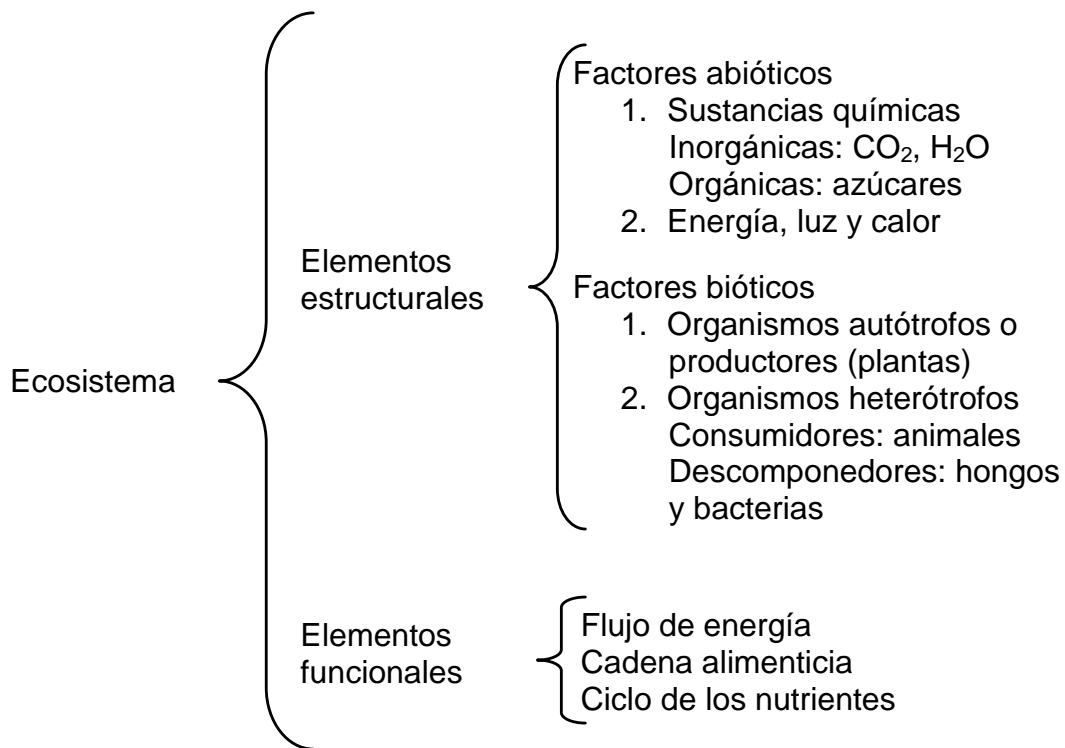


Figura 1. Elementos y factores del ecosistema (López, 2006).

4.2. Definición operativa de agroecosistema

El agroecosistema para fines de esta investigación es un ecosistema modificado en mayor o menor grado por el hombre, para la utilización de los recursos naturales en los procesos de producción agrícola, pecuaria, forestal y de fauna silvestre (Álvarez y Ferrera-Cerrato, 1994). El proceso de producción agrícola en particular cultivado con gramíneas (pastos), está integrado por los factores abióticos siguientes: suelo, planta, agua y factores climáticos, los cuales intervienen en el flujo de energía externa (renovable o no renovable) para mantener el sistema, se utiliza maquinaria, trabajo físico-manual e insumos agrícolas (semillas, plaguicidas y fertilizantes), se establece un plan de manejo convencional, tradicional y semi-convencional, según el objetivo de la producción, se plantean temporadas de cultivos considerando las épocas del año, temperatura, intensidad de luz y precipitaciones (Martínez, 2004).

Por lo anterior, es en el recurso suelo-planta-atmosfera donde se han presentado efectos negativos que son derivados de una agricultura industrializada, provocando que el recurso suelo presente problemas de erosión en las propiedades físicas, químicas y biológicas. De igual manera, en el recurso planta ha ocurrido principalmente una pérdida de la diversidad genética, mientras que en el recurso atmosfera se está padeciendo el efecto invernadero, cambio climático, reducción de la capa de ozono y la lluvia acida derivada de la industrialización (Martínez, 2004).

Mientras, que la mayoría de los elementos que se liberan al sistema suelo-planta son absorbidos por los microorganismos y las raíces, algunos de éstos entran a formar parte de los tejidos celulares como componentes orgánicos, quedando almacenados e inmovilizados durante un cierto tiempo en la biomasa (Porta *et al.*, 2003).

4.3. Factores ambientales e industriales que afectan al agroecosistema del trópico húmedo

Los agroecosistemas en el trópico húmedo han sido degradados desde el punto de vista agrícola, derivado de las actividades humanas, entre las que se encuentran la estructura de las comunidades (riqueza de especies, composición de especies y arquitectura de la red alimentaria) y el funcionamiento de los mismos ecosistemas (productividad, dinámica de los nutrientes y descomposición) (Begon *et al.*, 2006), pero también existen otros factores como los ambientales que afectan la diversidad, abundancia, condiciones microclimáticas, disponibilidad de alimentos (agua, polen, presas, etc.), recursos del hábitat (sitios de reproducción, refugio, etc.), competencia inter-específica y presencia de otros organismos (hiperparásitos, depredadores, etc.) (Nicholls y Altieri, 2002), así como otras formas de degradación, entre las que destacan la deforestación y el desarrollo urbanístico no planificado, los cuales declinan en gran medida la calidad y disponibilidad del agua, la interrupción de los ciclos hidrogeológicos y la gran pérdida de biodiversidad biológica (Morera, 2000).

Dentro de los factores industriales del trópico húmedo, en el sureste de México, se encuentra la actividad petrolera, que desde hace más de 50 años ha favorecido los asentamientos humanos, la práctica de la agricultura y ganadería, trayendo como consecuencias una gran alteración de la vegetación original que ha sido sustituida por pastizales (Sánchez-Hernández *et al.*, 2001), y la presencia de un sin número de sitios con diferentes niveles de impacto ambiental tanto en ecosistemas y agroecosistemas (Adams *et al.*, 1999).

Respecto a lo anterior, se presentan efectos como la lluvia ácida, la niebla fotoquímica, la destrucción de la capa de ozono y el efecto invernadero, que en conjunto provocan el cambio climático global. Sin embargo, un ecosistema alterado puede restablecerse mediante un proceso de adaptación por parte de los organismos vivos a las nuevas condiciones ambientales, si la perturbación no es frecuente, pero si es intensa puede ocasionar su desaparición (Campos, 2003).

4.3.1. Factores ambientales

Los factores ambientales que más afectan el desarrollo del proceso de producción de un agroecosistema son la temperatura ambiental y la disponibilidad de agua, principalmente la que proviene de la precipitación (Gliessman, 2002). La temperatura ambiental es un elemento fundamental del clima, ya que desempeña un papel primordial en la distribución de la vida vegetal y animal (Font, 2000). Se ha encontrado que la temperatura es benéfica para la descomposición de la materia orgánica en conjunto con la actividad microbiana (principalmente bacterias, actinomicetos, hongos y levaduras) a medida que se incrementa (Arias, 2007).

En las plantas se ha observado que el aumento de la temperatura acelera el desarrollo y reduce la duración de las etapas de desarrollo, reduce la eficiencia en el uso de los nutrientes, aumenta el consumo de agua y afecta la sincronía entre el efecto de la temperatura y del fotoperíodo (Fuhrer 2003). Temperaturas superiores a 40 °C inhiben la germinación de las semillas de muchos cultivos (FAO, 2000).

Por otra parte, las partículas del suelo son sensibles a los cambios bruscos de temperatura, sobre todo del día a la noche, afectando altamente el estado inicial de las rocas y provocando en éstas sucesivas dilataciones y contracciones, facilitando su desintegración. De igual forma, la alternancia de humedad y sequedad originan una expansión o contracción de la roca (Navarro y Navarro, 2003).

La precipitación se define como la cantidad de agua que se precipita desde las nubes y llega al suelo (Font, 2000). Los altos contenidos de agua en el suelo pueden causar daños físicos a los cultivos y una disminución en la tasa de difusión de oxígeno dentro del suelo (FAO, 2000).

La precipitación, que en el suelo se expresa como el contenido de humedad, es un factor que influye en el movimiento de los organismos del suelo, específicamente en los insectos, quienes se ven afectados por la humedad del suelo. Pero algunas bacterias y actinomicetos requieren una humedad superior al 90 % para activarse, mientras que los hongos lo hacen con un 60 % de humedad (Fuentes, 2007).

En cuanto a las plantas, estas requieren de una cierta cantidad de agua disponible en el suelo para que las raíces la aprovechen para realizar sus procesos fotosintéticos (Ehlers y Goss, 2003), ya que sin una adecuada humedad se marchitan y mueren; también presentan una adaptación a diferentes sustratos que permiten comprender los procesos por los cuales las especies vegetales compiten exitosamente (Escamilla *et al.*, 2005) en la búsqueda de agua, nutrientes, oxígeno y en la competencia con los microorganismos y con las raíces de otras plantas (MacAdam, 2009).

4.3.2. Factores industriales

El factor industrial que más afecta a los componentes del agroecosistema en el trópico húmedo de México es el derrame accidental de hidrocarburos del petróleo derivado de fugas, ruptura y desbordamiento de áreas de tratamiento de residuos de perforación de pozos petroleros (Rivera-Cruz y Trujillo-Narcía, 2004). Aunado a esto, a nivel nacional en el año 2008 se reportaron 329 fugas y derrames de hidrocarburos con un equivalente a 1,970 toneladas (PEMEX, 2009). Sin embargo, en el estado de Tabasco hasta el año 2006 se habían localizado tan solo 52 derrames de hidrocarburos en histosoles y manglares de los campos petroleros Cinco Presidentes, Rodador y La Venta, donde existen, 437 pozos, siete baterías de separación, tres estaciones compresoras de gas, una planta de inyección de agua y una red densa de gasoductos y oleoductos (García-López *et al.*, 2006).

4.4. El suelo y los efectos de los hidrocarburos del petróleo

El suelo es un cuerpo natural que comprende a sólidos (minerales y materia orgánica), líquidos (agua), y gases (aire) (Figura 2), el cual se caracteriza por tener horizontes o capas que se distinguen del material inicial como resultado de las adiciones, pérdidas, transferencias, y transformaciones de energía y materia o por la habilidad de soportar una vegetación, donde se dan las condiciones necesarias para el desarrollo de las plantas (USDA, 2006).

En el suelo se pueden distinguir cuatro grandes componentes: el material mineral, la materia orgánica, el agua y el aire, estos se encuentran íntimamente ligados y mezclados entre sí, originando un medio ideal para el crecimiento de plantas y organismos. Para que un suelo sea considerado como óptimo desde el punto de vista agrícola tiene que presentar una forma aproximada de los valores que se muestran en el Cuadro 1 (Navarro y Navarro, 2003).

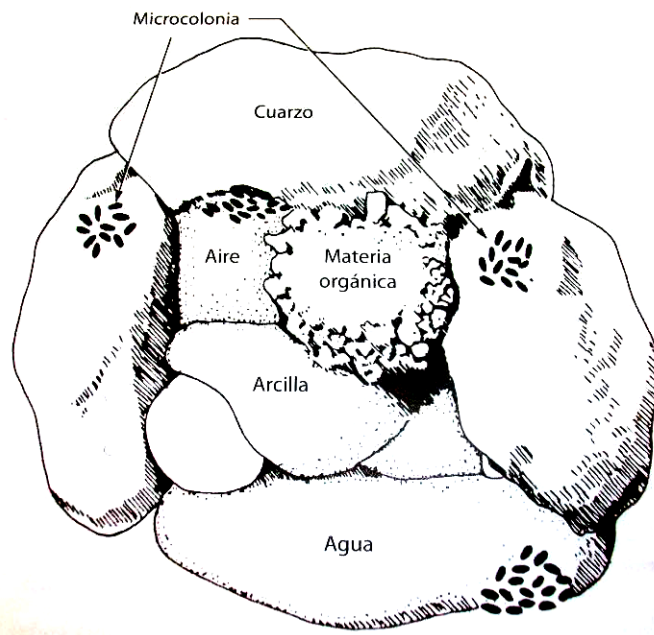


Figura 2. Partícula del suelo que muestra la distribución de las microcolonias bacterianas, agua, minerales y aire dentro de los poros (Atlas y Bartha, 2002).

En cuanto a los componentes minerales, estos son mayoritarios en los suelos a excepción de los suelos histosoles (suelos orgánicos). La proporción relativa de las diversas fracciones granulométricas de los componentes minerales son indicadores del grado de desarrollo de un suelo, que se representa por partículas de distintos tamaños, entre los que se encuentran la arena, el limo y arcilla, que en forma conjunta se les conoce como la textura del suelo (Porta *et al.*, 2008).

Cuadro 1. Composición media aproximada en volumen y peso de un suelo superficial.

Componente del suelo	Volumen (%)	Peso (%)
Material mineral	45	81
Materia orgánica	5	2
Agua	25	17
Aire	25	-

Típicamente, al ocurrir un derrame de petróleo en el suelo, los componentes de los hidrocarburos del petróleo se redistribuyen, quedando atrapadas dentro de los poros o adsorbiéndose en las superficies minerales y en la materia orgánica. En tanto, que si la cantidad de petróleo en el suelo es mayor que la capacidad de retención, la mezcla de hidrocarburos viajará a las zonas no saturadas (Fine *et al.*, 1997). Mas recientemente, se ha encontrado que a concentraciones muy bajas (2,500 mg kg⁻¹ HTP) se muestran efectos en el crecimiento vegetal y el impacto severo en varios parámetros físico y químicos de fertilidad, particularmente sobre la capacidad de campo, temperatura, capacidad de intercambio catiónico, repelencia al agua y porosidad, así como la afectación a los organismos del suelo por toxicidad directa; también se presentan cambios en el pH y se reduce la retención de humedad y/o nutrientes (Adams *et al.*, 2008).

4.4.1. Efectos en las propiedades físicas del suelo

Las propiedades físicas son el resultado de la desintegración del material parental del suelo por factores climáticos, topográficos y por las formas de vida en un periodo de tiempo. Entre las propiedades físicas más importantes del suelo se encuentran el color, la humedad, la textura, la estructura, la porosidad, el drenaje, la permeabilidad y la consistencia (Behari, 2001; Gómez, 2004).

4.4.1.1. Contenido de humedad

El contenido de humedad del suelo es la masa de agua perdida por unidad de masa seca (Schaetzl y Anderson, 2005). Se consideran como principales fuentes de humedad a la lluvia y el rocío, quienes dependen de las fluctuaciones de temperatura y humedad del aire (Adl, 2003). En contenidos superiores a 70% de humedad se presenta una reducción del contenido de aire, se activan los mecanismos de protección en la membrana celular de los microbios, se reduce la vida de muchas bacterias y virus (Minke, 2006), pero en condiciones aproximadas de 35 % de humedad se ha encontrado que es benéfica para las plantas (Fernández *et al.*, 2006) y la actividad biológica del suelo que dependen de la aireación y de los espacios porosos que ella coexisten (Adl, 2003).

Sin embargo, en suelos contaminados con 25 g de petróleo crudo se reduce el contenido de humedad del suelo (Njoku *et al.*, 2009), esta reducción según Andrade *et al.* (2004) se debe a la baja porosidad, permeabilidad e infiltración del agua en las partículas de suelo, debido a un recubrimiento parcial de los hidrocarburos sobre la superficie del suelo, reduciendo su capacidad de retención (Osuji y Nwoye, 2007). Asimismo, Adams *et al.* (2008), encontraron que en contenidos mayores a $6,000 \text{ mg kg}^{-1}$ de HTP se mantiene una relación directa con la reducción en la capacidad de campo, presentando una disminución en la producción de biomasa vegetal.

Los hidrocarburos del petróleo como el combustóleo provocan una disminución en los valores de arcilla, mientras que las arenas aumentan y los limos muestran muy poca variación en concentraciones de $150,000 \text{ mg kg}^{-1}$, mostrando variaciones en los cambios de la textura del suelo (Martínez y López, 2001). De igual manera, Caravaca y Roldán (2003) observaron que la contaminación por hidrocarburos disminuyó el contenido de arcilla y aumentó el contenido de arena. Estos cambios pueden deberse a la adsorción de los hidrocarburos en los coloides minerales del suelo como las arcillas y las sustancias húmicas que modifican la tasa de sedimentación de acuerdo a la ley de Stokes.

4.4.2. Efecto en las propiedades químicas del suelo

Las propiedades químicas son de vital importancia para que los organismos vivos se establezcan en el suelo (Porta *et al.*, 2003). Entre las principales propiedades se encuentran los contenidos de materia orgánica, carbono orgánico, capacidad de intercambio catiónico y potencial hidrógeno, que se relacionan con el contenido y tipo de arcilla (Gómez, 2004), así como pequeñas fracciones de elementos minerales (macronutrientes y micronutrientes) (Porta *et al.*, 2003).

4.4.2.1. Potencial hidrogeno

El potencial hidrógeno (pH) es una medida de la acidez o basicidad de una solución que depende de la concentración de iones hidrógeno, generalmente a la temperatura de 20 a 25 °C. (Basáez, 2009). Principalmente se encuentra afectado por factores como el tipo y cantidad de constituyentes orgánicos e inorgánicos que contribuyen a la acidez del suelo, la concentración de sales en la solución, la relación suelo:solución, la presión parcial de bióxido de carbono, entre otras. Actualmente en México se recurre a la clasificación propuesta en la NOM-021-RECNAT-2000 (Cuadro 2) que describe los niveles de pH que se utilizan en suelos con fines agrícolas y de fertilidad de suelos (DOF, 2002), aunque el pH óptimo es el neutro, debido a que existe una mayor solubilidad y disponibilidad de los nutrimentos para las plantas (Casanova, 2005).

Cuadro 2. Interpretación de valores de pH.

Clasificación	Valor de pH
Fuertemente ácido	< 5.0
Moderadamente ácido	5.1 – 6.5
Neutro	6.6 – 7.3
Medianamente alcalino	7.4 – 8.5
Fuertemente alcalino	> 8.5

Fuente: DOF, 2002

Los valores ácidos de pH en suelo contaminado con hidrocarburos, según Osuji y Nwoye (2007), pueden estar relacionados con la producción de ácidos orgánicos derivada de los exudados del metabolismo microbiano. Pero en suelos contaminados con dosis de 100 a 150000 mg kg⁻¹ de gasolina y combustóleo, no se muestra modificación alguna (Martínez y López, 2001).

En cambio, un estudio realizado por Caravaca y Roldán (2003) determinó que el pH disminuye al entrar en contacto con los hidrocarburos del petróleo. Sin embargo, el pH óptimo para que se efectúe la actividad microbiana en la biodegradación de hidrocarburos se encuentra entre 6.5 y 8 (García *et al.*, 2000).

4.4.2.2. Materia orgánica y carbono orgánico

La materia orgánica es una fracción de la composición del suelo, que incluye restos de plantas y animales en varios estados de descomposición, células, tejidos de organismos del suelo, sustancias de las raíces de las plantas y microorganismos del suelo (USDA, 1996). Dentro de las sustancias de las raíces se pueden encontrar glúcidos, taninos, resinas, grasas, aceites, pigmentos y compuestos nitrogenados, pero la rapidez de descomposición de estas sustancias está determinada por las condiciones del medio como el clima y el tipo de suelo (Navarro y Navarro, 2003).

Tan solo una fracción de la materia orgánica llega a ser estabilizada (Gliessman, 2002), mediante la transformación en carbono orgánico (60 a 80 %) y una proporción se devuelve a la atmósfera en forma de CO₂, mientras que el carbono no mineralizado sufre procesos de oxidación y mediante complejas transformaciones por la biomasa microbiana o se estabiliza en forma de sustancias húmicas (González-Pérez *et al.*, 2004).

La cantidad de carbono orgánico no solo depende de las condiciones ambientales locales, sino que es afectada fuertemente por el manejo del suelo en donde intervienen las propiedades químicas del mismo. Asimismo, el carbono orgánico es utilizada como fuente de energía por los organismos heterótrofos del suelo (Martínez *et al.*, 2008). Por otra parte, se afecta a la productividad a través de los efectos en la estructura del suelo y la capacidad de agua disponible para la plantas (Lal, 2003).

En cuanto a los efectos de los hidrocarburos, se ha encontrado que el carbono orgánico aumenta a medida que se incrementan los contenidos de HTP (Wang *et al.*, 2010; Caravaca y Roldán, 2003), debido a la oxidación de los hidrocarburos (Martínez y López, 2001). Asimismo, Pardo *et al.* (2004) observaron que la adición de hidrocarburos al suelo ocasiona el aumento de la cantidad de carbono que se encuentra disponible para la actividad metabólica de los microorganismos, lo que puede deberse a que el horizonte orgánico junto con las arcillas actúan como una membrana absorbente del petróleo (Rivera-Cruz *et al.*, 2002a).

4.4.2.3. Nitrógeno total

El nitrógeno (N) es un elemento de importancia biológica en todos los ecosistemas, tanto acuáticos como terrestres, ya que es un elemento dominante en la atmósfera, donde se produce principalmente en forma de gas, y mediante una serie de reacciones llega a formar parte de los ácidos nucleicos ADN y ARN, siendo de gran importancia para la reproducción y evolución de las especies (Lavelle y Spain, 2003).

En base a lo anterior, el nitrógeno es esencial para el crecimiento de las plantas y se encuentra en el suelo en forma orgánica e inorgánica. El N orgánico sirve como reserva, y a medida que se descompone y mineraliza la materia orgánica se transforma en nitrógeno inorgánico, quedando disponible para las plantas (Marín *et al.*, 2002). Pero entre los horizontes superficiales, cerca del 90 % al 95 % del N total se encuentra formando compuestos orgánicos (aminoácidos, aminoazúcares y estructuras heterocíclicas) y el resto formando minerales (NO_3^- y NH_4^+), de los que los amónicos pueden estar o no fijados en las arcillas (Heras *et al.*, 2003).

Los contenidos de N total en el suelo contaminado con hidrocarburos del petróleo disminuyen a medida que se incrementa el tiempo de permanencia del petróleo en el suelo (Wang *et al.*, 2010). En cambio, Caravaca y Roldán (2003) encontraron que el contenido de N total se incrementó 9.2 veces en suelo contaminado, respecto al suelo no contaminado, sin embargo, los altos contenidos de N en el suelo pueden estar asociados con las grandes densidades de microorganismos degradadores de hidrocarburos (Mohn y Stewart, 2000).

4.4.2.4. Fósforo disponible

El fósforo (P) es un elemento fundamental para la nutrición de las plantas. Es absorbido por éstas en forma de fosfatos mono y diácidos, dependiendo del pH del suelo, siendo un elemento poco móvil (Rossi *et al.*, 2006); también es necesario para el desarrollo de las raíces, para controlar la madurez de la planta y la formación de semillas, y forma parte de los componentes esenciales en el metabolismo de la energía (a través de su participación en el ADP y ATP) y una serie de vías metabólicas. Es un componente estructural de las coenzimas, fosfoproteínas y fosfolípidos, como componentes de los ácidos nucleicos (ADN y ARN), que forman parte de la información genética del sistema (Marín *et al.*, 2002; Lavelle y Spain, 2003).

Valores bajos de pH (<5) favorecen la solubilización de calcio, magnesio, hierro, aluminio y manganeso, que reaccionan rápidamente con los iones fosfato, adsorbiendo y/o precipitando el fósforo soluble. De este modo, se ve afectada la disponibilidad del nutriente proveniente de fertilizantes (Rossi *et al.*, 2006). Pero en suelos contaminados con hidrocarburos los contenidos de P tienden a disminuir respecto a suelos no contaminados (Caravaca y Roldán, 2003)

4.4.3. Efectos en organismos vivos del suelo

Los organismos del suelo, incluidos la flora y la fauna, desempeñan funciones sumamente importantes para el crecimiento de las plantas y sirven como fuente de energía para otros organismos (Casanova, 2005); actúan como reguladores del ciclo de nutrientes a través de medios indirectos como el consumo de microorganismos, la depredación sobre los microbívoros, la modificación del hábitat, la producción de nuevos sustratos como heces, el transporte de algunos componentes del suelo a través de sus cuerpos y la propagación de inóculos microbianos (Álvarez-Sánchez y Naranjo-García, 2003).

Muchos organismos presentan una serie de estrategias de adaptación al medio en que se encuentran. Entre sus principales características está el tamaño de su cuerpo y los patrones de las vías respiratorias. También existen organismos que necesitan de altos niveles de humedad y con frecuencia requieren de agua libre en su entorno (Lavelle y Spain, 2003).

Los organismos del suelo se clasifican, según su tamaño, en dos grupos: macrofauna y microflora (Arias, 2007). Tanto unos como otros están constituidos por formas animales y vegetales (Cuadro 3) (Navarro y Navarro, 2003; Casanova, 2005).

4.4.3.1. Macrofauna

La macrofauna del suelo incluye a los invertebrados visibles a simple vista que viven, total o parcialmente, dentro del suelo o inmediatamente sobre él. Estos invertebrados (lombrices de tierra, insectos, milpiés, arañas, caracoles y escorpiones, entre otros) pueden incluir más de un millar de especies en un sólo ecosistema y alcanzar densidades y biomásas de más de un millón de individuos y más de una tonelada por hectárea, respectivamente (Brown *et al.*, 2001). Muchos utilizan como fuente de alimento los tejidos vegetales que se encuentran en descomposición (Navarro y Navarro, 2003).

Cuadro 3. Grupos más importantes de organismos presentes en el suelo.

Animales	Macro	Mamíferos pequeños	
		Insectos	
		Caracoles y babosas	
		Arácnidos	
	Lombrices de tierra		
Micro	Nematodos		
	Protozoos		
	Rotíferos		
Vegetales	Macro	Raíces de plantas superiores	
	Algas	Verdes	
		Verde-azuladas	
		Diatomeas	
	Micro	Hongos	Setas
			Levaduras
			Mohos
		Actinomicetos	
	Bacterias	Aerobias	
		Anaerobias	
Autótrofas			
Heterótrofas			

Fuente: Navarro y Navarro, 2003; Casanova, 2005

Estos organismos juegan un papel importante en la estructura del suelo, en el reciclaje de nutrientes y en la dinámica del contenido de materia orgánica del suelo (Lal, 2003); específicamente cumplen funciones mecánicas (formación de agregados estables, de poros, etcétera), químicas (evitan la lixiviación de elementos nutritivos, es decir, son intermediarios entre el suelo y la planta) y biológicas (selección y estimulación de la flora microbiana en el suelo) (Gómez, 2004).

Existen pocos estudios sobre la diversidad de la macrofauna en suelos contaminados con hidrocarburos del petróleo. Entre las más representativas se encuentran los colémbolos, dípteros, crustáceos, himenópteros, arácnidos, psocópteros y anélidos (Uribe-Hernández *et al.*, 2010). Algunos anélidos e insectos muestran una alta resistencia a condiciones anóxicas (Miranda y Restrepo, 2005).

La presencia de hidrocarburos del petróleo afecta a la macrofauna mediante toxicidad directa, modificando su composición y abundancia (Adams *et al.*, 2008), tal como ocurre con algunas especies de Collembola de los géneros *Acherontides*, *Juxtlahuacaensis* y *Smithurides*, que son consideradas como indicadoras de suelos ácidos con contenidos altos de hidrocarburos (Uribe-Hernández *et al.*, 2010).

4.4.3.2. Microflora

La microflora, está compuesta por organismos pequeños, no visibles a simple vista por lo cual solo pueden observarse a través de microscopios. Este grupo lo integran principalmente las bacterias y los hongos, los cuales son capaces de proveer a las plantas diferentes nutrientes en forma asimilable. Las bacterias, que miden de 4-5 μm de longitud pueden ser de forma redonda, bacilar o espiraladas y se presentan en el suelo formando colonias (Navarro y Navarro, 2003).

La principal fuente de energía para la microflora del suelo es el material orgánico que proviene de la parte aérea de las plantas (hojas, flores, frutos, tallos, etc.) y sus raíces, las cuales debido a su continuo crecimiento, aumentan la superficie radical, y la actividad metabólica de la microflora puede cambiar el ambiente del suelo en la zona inmediata a las raíces, viviendo bajo condiciones de parásitos o en simbiosis (Casanova, 2005).

Se ha demostrado que la microflora vive fundamentalmente en el área de la rizósfera, siendo escasa en el suelo que está alejado de la raíz. Existen varias razones para ello: 1) las raíces proveen una fuente de nutrientes para la microflora, tanto para parásitos como simbióticos, 2) la mejor actividad microbiana se efectúa a temperaturas entre 20-40 °C y 3) aumentan las poblaciones microbianas en suelos neutros o ligeramente alcalinos, mientras que en condiciones de acidez la población bacteriana tiende a disminuir (Arias, 2007; Casanova, 2005).

Estudios recientes han demostrado que la adición de fertilizantes químicos a suelos contaminados con diesel, ayuda a estimular la capacidad autóctona de las poblaciones microbianas en las tasas de degradación de este contaminante (Shing y Li, 2009). Según Valenzuela *et al.* (2006), los hongos heterótrofos son más efectivos que las bacterias para degradar compuestos del petróleo, observándose un efecto positivo de los exudados de las raíces para permitir el crecimiento microbiano (Rentz *et al.*, 2004; Hernández *et al.*, 2003).

4.4.3.2.1. Bacterias fijadoras de nitrógeno

La fijación biológica del nitrógeno es importante en los sistemas agrícolas, por que proporciona una fuente de nitrógeno, que muchas veces limita el crecimiento de las plantas, debido a la continua pérdida por desnitrificación, por erosión del suelo, por lixiviación o por volatilización química, es realizada principalmente por microorganismos llamados diazótrofos (Buscot y Varma, 2005).

La fijación mas significativa de nitrógeno en sistemas agrícolas es llevada a cabo por bacterias heterótrofas, que dependen de fuentes externas de carbono reducido, aunque algunas autótrofas son capaces de reducir el dióxido de carbono (Anaya, 2003).

El nitrógeno del aire entra en el ciclo del nitrógeno a través de la acción de los microorganismos (Buscot y Varma, 2005), reduciéndose a amoníaco, y convertido a una forma orgánica (Madigan *et al.*, 2004). Esta reducción transcurre en un sistema enzimático denominado sistema de la nitrogenasa, que consta de dos proteínas distintas llamadas nitrogenasa y la nitrogenasa reductasa, ambos componentes están asociados, se localizan en el citoplasma y son extraordinariamente sensibles al oxígeno. Lo anterior hace referencia al por que las bacterias anaeróbicas facultativas únicamente fijan nitrógeno en condiciones anóxicas, así como las cianobacterias dentro de los heterocistos y los rizobios en presencia de la hemoglobina (Schlegel, 1997).

La capacidad para fijar el nitrógeno está ampliamente extendida entre las bacterias del suelo. La mayoría de las bacterias aeróbicas únicamente pueden fijarlo a bajas presiones parciales de oxígeno (Schlegel, 1997), siendo los géneros *Azotobacter*, *Azospirillum* y *Beijerinckia* los más comunes (Madigan *et al.*, 2004). Al respecto, Buscot y Varma (2005) mencionan que las bacterias fijadoras de nitrógeno solo representan una pequeña fracción de la microflora del suelo, con densidades de 10^2 a 10^4 bacterias por gramo de suelo.

4.4.3.2.2. Bacterias solubilizadoras de fosfatos

El fósforo es uno de los elementos químicos mas importantes, debido a que participa en la transferencia de energía (Díaz, 2001), pero tan solo entre el 20 y el 85% del fósforo total en los suelos agrícolas se encuentran en forma orgánica, incluyendo esteres fosfatados, fosfolípidos, ácidos nucleicos, fosfatos vinculados a los azúcares y derivados del ácido fosfórico (Tarafdar *et al.*, 2001).

Esto sucede, debido a que los microorganismos solubilizadores de fosfatos son de gran importancia en las etapas de mineralización, con poblaciones variables en función del suelo, de la vegetación natural, del pH, de la temperatura, del contenido de materia orgánica, de la presencia de fosfato natural y otros factores.

Por otra parte, la descomposición microbiana de los exudados de la raíz lleva a un aumento menor en la solubilidad del fósforo, sin embargo cuando el potencial hidrogeno es bajo esta solubilidad aumenta (Díaz, 2001).

En el suelo se pueden encontrar una amplia diversidad de bacterias solubilizadoras de fosfato; las mas comunes son: *Pseudomonas* spp., *P. cepacia*, *P. gladioli*, *Xanthomonas* spp. y *X. maltophilia*, las cuales se representan como bacilos y cocobacilos Gram negativos, correlacionándose positivamente con el carbono orgánico, la capacidad de intercambio catiónico y el porcentaje de arcillas (Useche *et al.*, 2004).

4.4.3.2.3. Bacterias solubilizadoras de potasio

El potasio es el tercer gran nutriente esencial para el crecimiento vegetal, desempeña un papel esencial para la activación de enzimas, síntesis de proteínas y en la fotosíntesis (Basak y Biswas, 2008). Actualmente se ha demostrado que las bacterias solubilizadoras de potasio, especialmente *Muciluginosus bacillus* provocan mayor disponibilidad de potasio en el suelo, aumentando la disponibilidad de estos minerales para la planta (Sheng *et al.*, 2002).

Autores como Basak y Biswas (2008) han encontrado que los microorganismos solubilizadores de potasio son capaces de solubilizar las formas disponibles de potasio contenidas en minerales como la illita y la ortoclasa, a través de la producción y excreción de ácidos orgánicos como los ácidos cítrico, oxálico y tartárico.

Por otra parte, Lin *et al.* (2002) encontraron que la asociación de las bacterias solubilizadoras de potasio con feldespatos produce ácidos carboxílicos y polisacáridos, por lo cual pueden tener un uso agrícola en suelos deficientes de potasio (Sheng, 2005).

4.4.3.2.4. Hongos heterótrofos

Los hongos heterótrofos predominan en todos los tipos de suelos, pero la cantidad y calidad de la materia orgánica tiene un efecto directo sobre su cantidad (Buscot y Varma, 2005). Se denominan organismos heterótrofos principalmente por que ingieren a otros organismos o partículas de materia orgánica (Odum y Barrett, 2006).

Los hongos heterótrofos son dominantes en los suelos ácidos, ya que un medio ácido no es propicio para la existencia de bacterias o actinomicetos, resultando un mayor consorcio de hongos para la utilización de sustratos orgánicos (Buscot y Varma, 2005). Por otra parte, estudios realizados por Obire y Anyanwu (2009), encontraron 14 géneros de hongos heterótrofos degradadores de hidrocarburos. Estos incluyen a las especies *Alternaria* sp., *Aspergillus* sp., *Cephalosporium* sp., *Cladosporium* sp., *Fusarium* sp., *Geotrichum* sp., *Mucor* sp., *Penicillium* sp., *Rhizopus* sp. y *Trichoderma* sp. Estos microorganismos desempeñan un papel esencial en los ciclos biogeoquímicos, desarrollando sus actividades metabólicas en un medio ambiente alterado.

Incluso los hongos heterótrofos hospedados en la rizósfera de *B. brizantha* y *P. coccineus*, aumentan en suelo contaminado con combustóleo en concentraciones de 50,000 mg kg⁻¹ (Sangabriel *et al.*, 2006). Por otra parte, Dorantes (2008) encontró una asociación positiva de los hongos en suelos contaminados con 100,000 mg kg⁻¹ de petróleo crudo.

4.5. Efectos del petróleo en las plantas

Las plantas son organismos que nacen, crecen, se reproducen y mueren, representando su desarrollo vegetativo en base a cuatro etapas: germinación, crecimiento, floración y/o reproducción, senectud o muerte. Pero existen muchos factores que afectan el desarrollo vegetativo, entre ellas, las propiedades físicas, químicas y microbiológicas del suelo, así como propiedades externas al suelo (temperatura, precipitación, radiación solar, entre otras) (Kass, 1996).

Muchos de estos factores están implicados en el desplazamiento de plantas nativas por otras más tolerantes a las condiciones del suelo, favoreciendo la transformación de los hábitats (Rodríguez-Echeverría, 2009).

Una planta se encuentra integrada por la raíz, el tallo, la hoja y los órganos reproductores (Fuentes, 2001). En una pradera se pueden establecer principalmente gramíneas como *Paspalum fasciculatum*, *Andropogon bicornis*, *Paspalum virgatum*, *Imperata cylindrica* y *Sporobolus poiretii*, con fines de solucionar problemas de alimentación en las unidades de producción, así como cyperaceas, entre las que se encuentran *Dichromena ciliata*, *Cyperus ferax*, *Cyperus rotundus*, *Scleria pterota* y *Killinga sesquiflora* (Estrada, 2002; Rojas *et al.*, 2005).

La temperatura del aire juega un papel importante en la asimilación clorofílica y en la transpiración, pero en cada planta existe un máximo y un mínimo de temperatura más allá de los cuales no puede vivir. En cambio, el agua que generalmente es absorbida por medio de las raíces dentro del suelo, resulta indispensable para la vida de las plantas. Es por eso, que el exceso o la falta de agua son factores esenciales de la diferenciación de las plantas y de las formaciones vegetales (Huetz, 2005).

Se denomina biomasa vegetal a la cantidad de masa vegetal que encontramos en un ecosistema por unidad de área (Fernández y Leiva, 2003), el cual se acumula sobre el nivel del suelo (entrenudos aéreos del tallo, hojas y estructuras reproductivas) (Barioglio, 2006). Se ha encontrado que los ecosistemas agrícolas tienen mucha menos biomasa que los ecosistemas naturales, ya que el hombre elimina constantemente la biomasa vegetal al cosechar, podar, mantener densidades óptimas para producir lo que le interesa y eliminar las malas hierbas (Fernández y Leiva, 2003).

La raíz es el órgano subterráneo de las plantas; su función consiste en fijar la planta al suelo, absorber el agua y las sales minerales del mismo. Comienza a crecer a partir de la base del tronco por debajo del suelo, luego se dispersan en varias direcciones a diversas profundidades (Gobat *et al.*, 2004), actuando como barreras al paso libre de agua y nutrimentos hacia el interior de las plantas (Escamilla *et al.*, 2005),

Según se desarrollan y profundizan en el suelo, el sistema radical puede ser: a) extenso, si las raíces se extienden en forma longitudinal, b) pivotante, cuando predomina una raíz principal que se ramifica en otras de menor tamaño, y c) fasciculado, cuando todas las raíces salen del tallo y alcanzan casi la misma longitud (Figura 4). También desde el punto de vista de su origen, las raíces pueden ser: normales, si se originan del extremo inferior del tallo o de otra raíz, y adventicias, si salen de los primeros nudos del tallo, como el caso del maíz (Fuentes, 2001).

Las raíces modifican al suelo, específicamente en sus características físicas y químicas: asimismo, se establece un espacio denominado rizósfera en donde se depositan los exudados orgánicos e inorgánicos de la raíz que entra en contacto con el suelo, y son la fuente primaria de energía para las redes tróficas edáficas (Rodríguez-Echeverría, 2009).

La rizósfera es una zona donde la actividad microbiana suele ser intensa, debido al hecho de que las raíces excretan cantidades considerables de azúcares, aminoácidos, hormonas y vitaminas, estimulando un crecimiento de bacterias y hongos (Madigan *et al.*, 2004; Mukerji *et al.*, 2006). Se desarrolla en un medio aeróbico, y en forma conjunta con los microorganismos, poseen el potencial para mejorar las propiedades físicas de los suelos, liberando nutrientes en formas que pueden ser utilizados por las mismas plantas (Buscot y Varma, 2005).

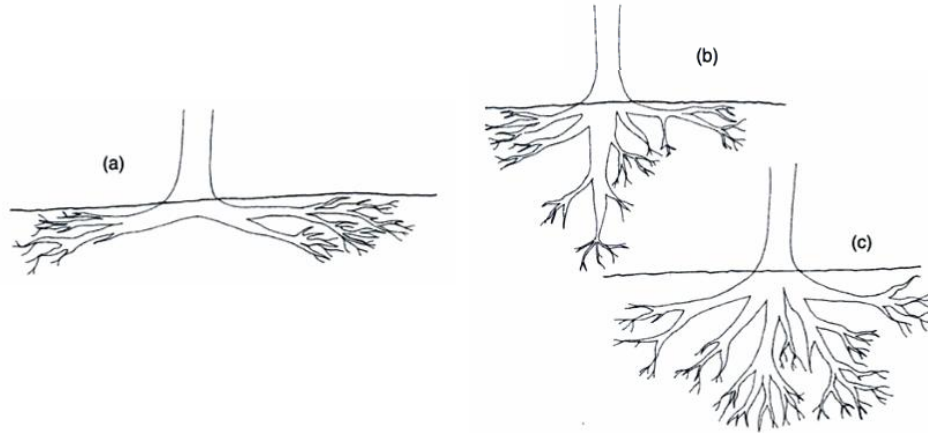


Figura 4. Forma de las raíces: a) extenso b) pivotante y c) fasciculada (Gobat *et al.*, 2004).

Gobat *et al.* (2004) afirman que la rizósfera (Figura 5) está constituida por la cofia, el meristemo apical y los pelos radiculares. La cofia es una masa de proliferación de células que constituyen una especie de escudo protector para el ápice, que al entrar en contacto con el suelo en la capa de la raíz se puede encontrar como cobertizo y se renueva continuamente. El meristemo apical, es una zona de multiplicación celular, donde se lleva a cabo el crecimiento de la raíz primaria. Los pelos radiculares son extensiones que sirven de anclaje en el suelo, y actúan como un punto de apoyo del crecimiento apical. Sin embargo, el recuento de microorganismos es casi siempre superior en la rizósfera que en el rizoplano y regiones del suelo donde no hay raíces (Madigan *et al.*, 2004).

Los efectos de los hidrocarburos del petróleo en el crecimiento y desarrollo de las plantas que se establecen en una pradera, han sido reportados en diferentes investigaciones, como los encontrados por Rivera-Cruz y Trujillo-Narcía (2004), quienes descubrieron que los hidrocarburos del petróleo afectan en un 50 % la producción de biomasa, y diversidad vegetal. También se ha encontrado que en concentraciones de $50,000 \text{ mg kg}^{-1}$ de HTP se reduce la biomasa total de las especies vegetales *Leucaena sp.*, y *Mimosa pigra* en un 31 % y 25 %, respectivamente (Rivera-Cruz *et al.*, 2005).

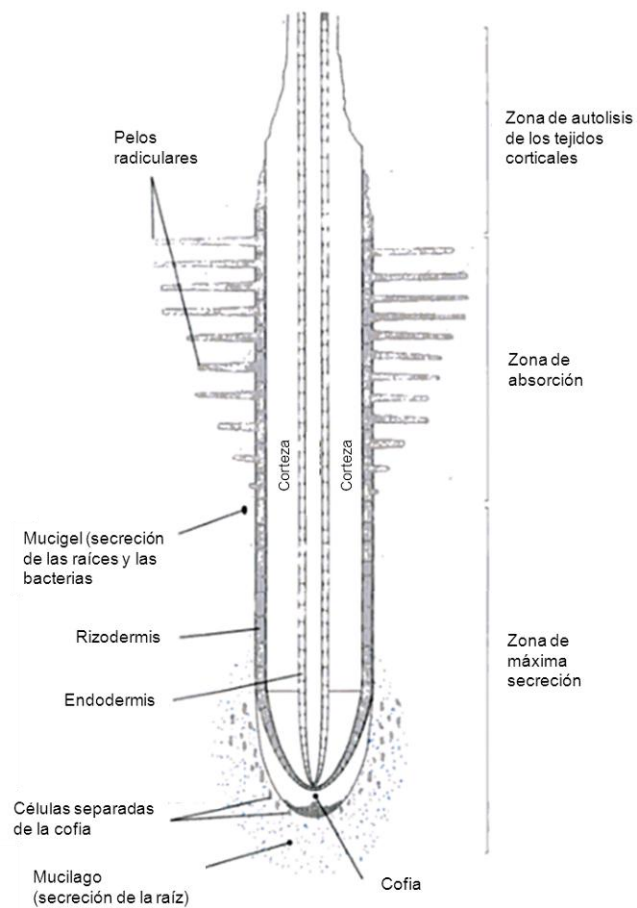


Figura 5. Regiones que forman la rizósfera (Gobat *et al.*, 2004).

Las plántulas y plantas de rábano (*Raphanus sativus* L.) son sensibles a contenidos iguales o mayores de $3,000 \text{ mg kg}^{-1}$ de petróleo, ya que provocan efectos tóxicos en la altura, la biomasa aérea seca y la biomasa seca radical (Alejo, 2006). La especie *Lolium multiflorum* Lam., expuesto durante 95 días a contenidos de $1,517 \text{ mg kg}^{-1}$ de HTP también mostró un efecto negativo sobre el rendimiento de materia seca (Liste y Felgentreu, 2006). Contenidos iguales o mayores a $4,500 \text{ mg kg}^{-1}$ de petróleo inhiben la emergencia, la altura y la biomasa seca de frijol (*Phaseolus Vulgaris* L.) (Arias, 2008).

Por otra parte, contenidos de 79,457 mg kg⁻¹ de petróleo en el suelo reducen severamente la altura y la formación de biomasa vegetal del pasto alemán (*E. polystachia*), del pasto egipto (*B. mutica*), del cebollín (*Cyperus* sp.), del tulillo (*Cyperus articulatus*) y de la zarza (*Mimosa pigra*) (Rivera-Cruz y Trujillo-Narcía, 2004). De igual forma contenidos del 3 % de hidrocarburos livianos, muestran mayor producción de biomasa aérea en los pastos *B. brizantha* y *P. máximum*, respecto al suelo no contaminado (Hernández y Mager, 2003).

Diversos estudios muestran que las raíces de las plantas tienen una gran influencia en las comunidades microbianas del suelo, específicamente en la rizósfera (Kirkpatrick *et al.*, 2008). Al respecto, Hou *et al.* (1999) encontraron que las gramíneas poseen un sistema de raíces fibrosas que proveen de un gran área superficial para la microflora de la rizósfera en suelos contaminados con petróleo, pero los altos contenidos de estos contaminantes puede formar una capa hidrofóbica en las raíces de las plantas (Peña-Castro *et al.*, 2006).

En cambio, Quiñones-Aguilar *et al.* (2003) demostraron que concentraciones de 25,000 mg kg⁻¹ de petróleo permitió un mejor crecimiento y desarrollo del maíz, con base en la emergencia, la altura de la planta, la longitud de la raíz, los pesos secos de follaje y de la raíz. Mientras que la contaminación con petróleo afecta el crecimiento y desarrollo de raíces en plantas de frijol (*Vigna unguiculata*), mostrando una tendencia de un enrollamiento de la raíz principal (Mujica *et al.*, 2006).

SECCIÓN V. MATERIALES Y MÉTODO

La investigación se realizó parcialmente en el Laboratorio de Microbiología Ambiental y Aplicada del Colegio de Postgraduados Campus Tabasco, se localiza en Huimanguillo, Tabasco, México. Se desarrolló en cuatro etapas secuenciales: Etapa I. Trabajo de campo. Etapa II. Muestreo de plantas-suelos y rizósfera en puntos de muestreo y en un día referente a cada época del año [lluvias (30 de septiembre de 2009), nortes (30 de enero de 2010) y seca (30 de abril de 2010)]. Etapa III. Análisis de laboratorio. Etapa IV. Análisis estadístico de cada una de las variables por época del año (Figura 6).

5.1. Trabajo de campo

5.1.1. Selección de suelos

Los criterios utilizados para la selección del suelo en estudio fueron; a) presencia de perturbación por actividad de derrame de hidrocarburos del petróleo derivada de la actividad de la industria extractiva y de conducción del petróleo crudo y b) evidencias de uso agrícola y/o ganadero. Aunado a esto, se eligió un terreno, propiedad del señor Pascual Corzo (†) (Figura 8a), ubicado en el ejido José Narciso Roviroso, a dos kilómetros al suroeste del Complejo Procesador de Gas La Venta, en la localidad de Villa La Venta, Huimanguillo, Tabasco (Figura 7). Las coordenadas geográficas del sitio son 18° 4' 37.05" N y 94° 2' 28.28" O.

Las características del terreno son:

1. Presencia de infraestructura petrolera. Ocho ductos que atraviesan por la parte central del terreno en estudio, los cuales conducen petróleo crudo de los pozos de extracción al Complejo petroquímico La Venta en Huimanguillo, Tabasco, asimismo, otros ductos distribuyen petróleo crudo sin agua y gas del Complejo La Venta, al complejo petroquímico La Cangrejera, Coatzacoalcos.

Dos de estos ductos se localizan sobre la superficie del suelo, en ellos se observa un efecto de corrosión y deterioro del recubrimiento externo (Figura 8b y 8c), esto posiblemente se debe a que permanece expuesto a condiciones ambientales e inclusive a la falta de mantenimiento por parte de la paraestatal Petróleos Mexicanos, situación que ha provocado que los ductos presenten rupturas ligeras provocando el escape del petróleo crudo al suelo y este se vaya acumulando durante mas de 20 años (Rivera-Cruz y Trujillo-Narcía, 2004).

2. Presencia de una presa de tratamiento de residuos de petróleo que ha estado abandonada desde los años ochenta, así como de una caseta de protección catódica que sirve para prevenir la corrosión y el desgaste de los ductos que atraviesan por el sitio y presencia del pozo petrolero la venta 331 que actualmente se encuentra taponado (Figura 8d).

3. Presenta una restauración del suelo contaminado con petróleo realizada en el mes de abril del 2002, mediante tecnología de degradación bioquímica, la cual no fue eficiente debido a que se transfirió petróleo a suelo sin contaminación y a suelo con menor contaminación, lo que provocó alteración del uso del suelo porque se forma un cuerpo de agua de hasta medio metro de profundidad en época de lluvias y nortes, debido a que la materia orgánica fue destruida y no llenó el hueco donde se realizó la extracción del suelo contaminado (Trujillo-Narcía *et al.*, 2006).

4. El suelo es cultivado con pastos nativos e introducidos, los cuales sirven para la cría de ganado bovino y borrego de engorda (Figura 8a).

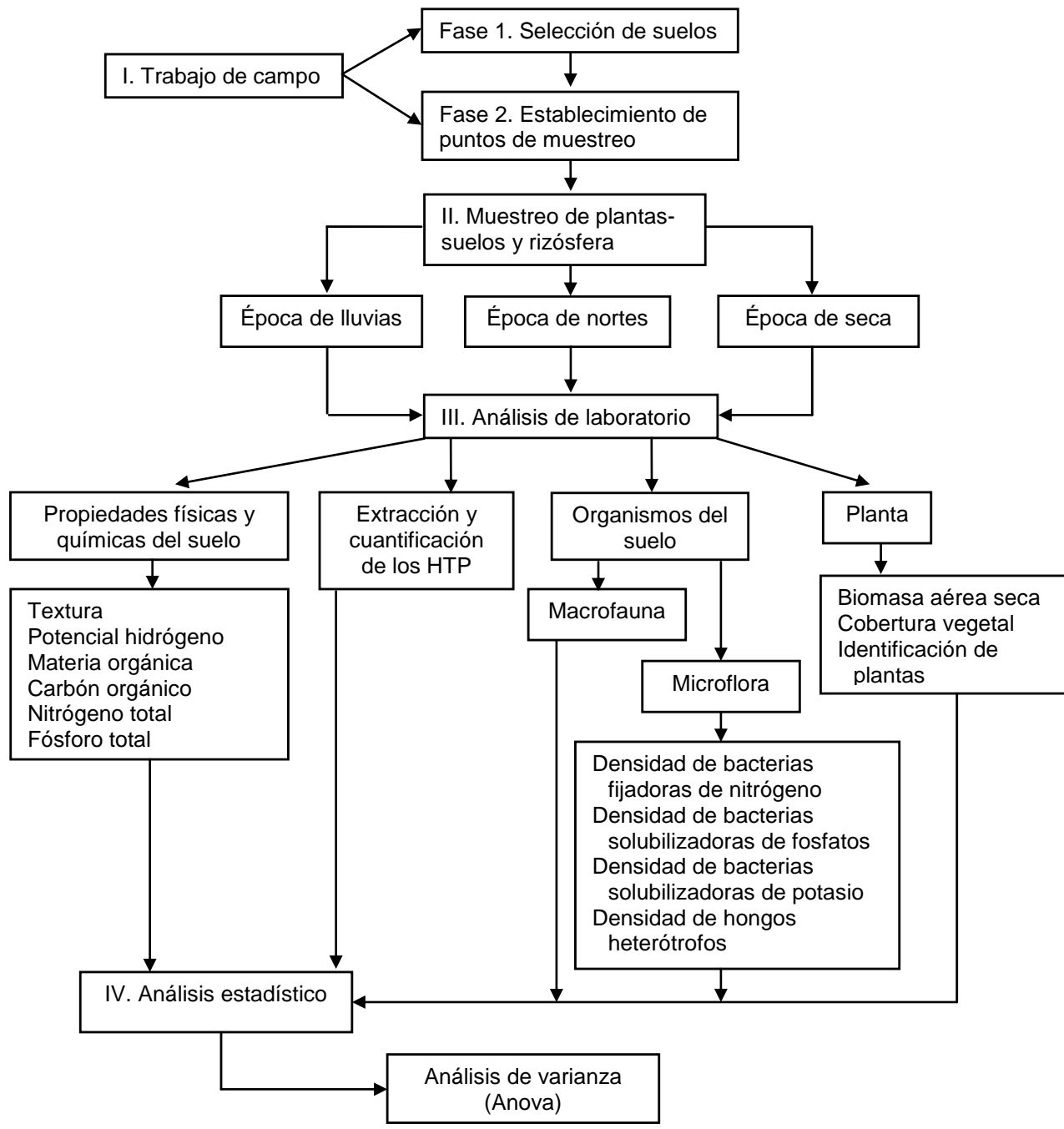


Figura 6. Flujoograma de la investigación.

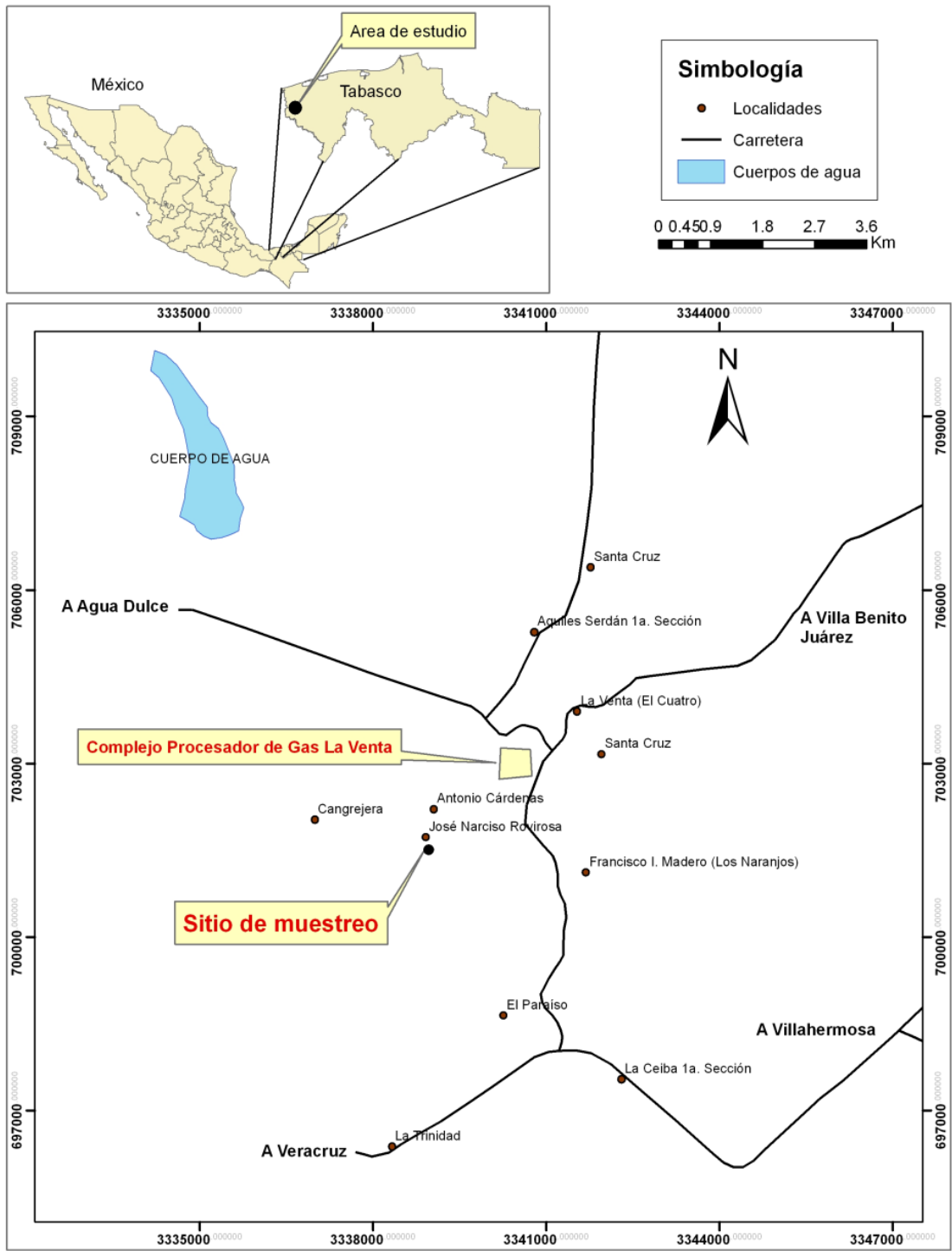


Figura 7. Ubicación del sitio de muestreo.

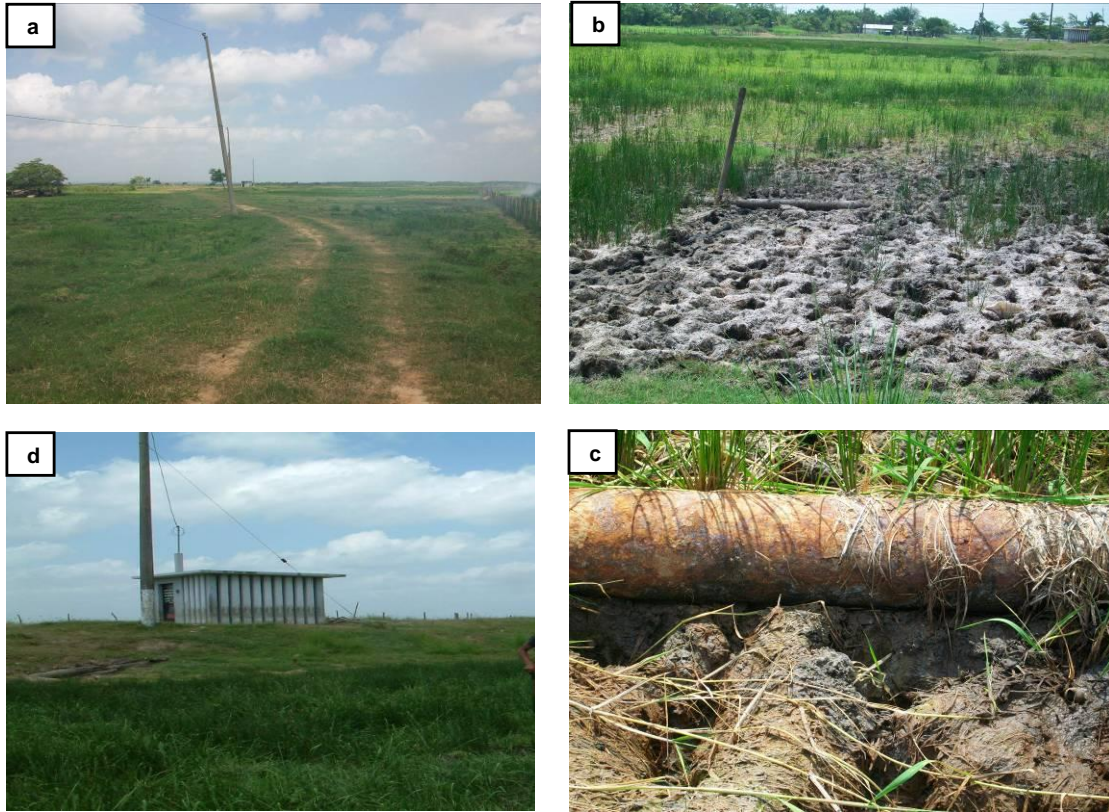


Figura 8. Panorámica del sitio de estudio. a) Vista general del área evaluada. b) Situación actual del suelo contaminado con hidrocarburos del petróleo. c) Estado actual de corrosión que presenta los ductos. d) Caseta de protección catódica.

5.1.2. Establecimiento de puntos de muestreo

La superficie del sitio objeto de estudio cuenta con una extensión de 44,321.199 m², en ella se distribuyeron completamente al azar nueve puntos, cada una de ellos con un área de dos metros cuadrados, la cual se cercó con malla borreguera (Figura 9). Se identificaron como: Punto 1 (P1), Punto 2 (P2), Punto 3 (P3), Punto 4 (P4), Punto 5 (P5), Punto 6 (P6), Punto 7 (P7), Punto 8 (P8) y Punto 9 (P9). La ubicación geográfica de cada una de los puntos son: P1 (18° 4' 40.5" N; 94° 2' 40.1" O), P2 (18° 4' 39.5" N; 94° 2' 39" O), P3 (18° 4' 41" N; 94° 2' 38.7" O), P4 (18° 4' 39.5" N; 94° 2' 37.1" O), P5 (18° 4' 39.6" N; 94° 2' 36.1" O), P6 (18° 4' 39.5" N; 94° 2' 34.7" O), P7 (18° 4' 39" N; 94° 2' 33" O), P8 (18° 4' 37.4" N; 94° 2' 32.5" O) y P9 (18° 4' 37" N; 94° 2' 31.3" O) (Figura 10).



Figura 9. Delimitación de los puntos de muestreo con malla borreguera.

Los puntos se distribuyeron tomando como referencia los ductos que atraviesan el terreno, la presa de quema, pozo taponado, y el camino que comunica la casa de familia con la presa de quema y pozo taponado, este atraviesa de manera vertical el terreno impidiendo el flujo libre de agua del este al oeste. Este camino fue construido en el año 2004, para permitir la entrada y salida de vehículos al pozo taponado (Figura 10).

La existencia del camino que se eleva a un metro de la superficie original se ha convertido en una barrera natural para retener después de las inundaciones (época de nortes) materiales que el agua acarrea cuando se eleva la lamina de agua, entre estos al petróleo quedando depositados en el área que ocupa los puntos 8 y 9 en la época de sequía (Figura 10).

Los puntos 1, 2 y 3 se distribuyeron sobre la superficie ubicada entre los ductos y la presa de quema – pozo taponado. Los puntos 4, 5 y 6 en la parte norte de la presa de quema-pozo taponado. El punto 7 al noreste de la presa de quema y norte del camino. Los puntos 8 y 9 se ubicaron al este de la presa de quema y del camino, al oeste de la casa habitacional de la familia (Figura 10).

5.2. Colecta de plantas-suelos-rizósfera

En particular para el estado de tabasco se reconocen tres épocas del año: la época de lluvias (de junio a octubre) caracterizada por precipitaciones de más de 300 mm mensuales y temperaturas que fluctúan de 16 a 30 °C; la época de nortes (de noviembre a febrero) con lluvias moderadas de hasta 250 mm mensuales con vientos fuertes y reducción de las temperaturas hasta de 16°C; la época de seca (de marzo a mayo) con temperaturas que oscilan entre 26 y 45 °C, así como bajas precipitaciones menores a 40 mm mensuales (INEGI, 2008). En base a lo anterior se efectuó la colecta de plantas, suelos y rizósfera en los nueve puntos de muestreo para un día específico de las tres épocas del año: en época de lluvias se colectaron muestras el 30 de septiembre de 2009, para la época de nortes el 30 de enero de 2010 y para la época de seca el 30 de abril de 2010.

5.2.1. Colecta de plantas

Para determinar la cobertura vegetal y biomasa vegetal existente en el suelo contaminado con hidrocarburos del petróleo, se realizó la colecta del total de plantas que crecieron en cada punto. Para la colecta se utilizó un molde de madera (1 m²) (Daubenmire, 1959), el cual se colocó en el interior y sobre la superficie del suelo que ocupa el punto de muestreo; se cortó el material vegetal aéreo desde la base del tallo con machete; se introdujo en bolsas de plástico, se etiquetó y se trasladó para el procesamiento en laboratorio.

5.2.2. Colecta de suelo

Se colectaron dos tipos de muestras una para microflora y otra para macrofauna. Para la microflora, se tomaron aproximadamente 30 g de suelo en el horizonte de 0-30 cm de profundidad y a una distancia no mayor a 10 cm de cada especie vegetal, el suelo se introdujo en un frasco de vidrio previamente esterilizado, se etiquetó el frasco y se colocó en una hielera a la temperatura de 4 °C, para trasladarla hasta el laboratorio en donde se guardó en un refrigerador por no más de 15 días.

En lo que respecta a la macrofauna se extrajeron del suelo monolitos de 25x25x30 cm, de acuerdo a la metodología propuesta por el programa Tropical Soil Biology and Fertility (TSBF) (Anderson and Ingram, 1993). Se depositaron en contenedores de plástico de la misma medida del monolito, se trasladaron hasta el laboratorio y se procesaron en tres días, todo esto para evitar pérdidas de la macrofauna del suelo.

5.2.3. Colecta de rizósfera

La rizósfera se colectó en cada una de las especies vegetales localizadas en cada punto para un día específico de la época de lluvias, nortes y seca. Se tomó aproximadamente 30 g de la raíz-suelo y se depositó en un frasco de vidrio previamente esterilizado, se etiquetó el frasco y se colocó en una hielera para mantenerlo a una temperatura de 4 °C. Se trasladó hasta el laboratorio donde se guardó en un refrigerador por no más de 15 días.

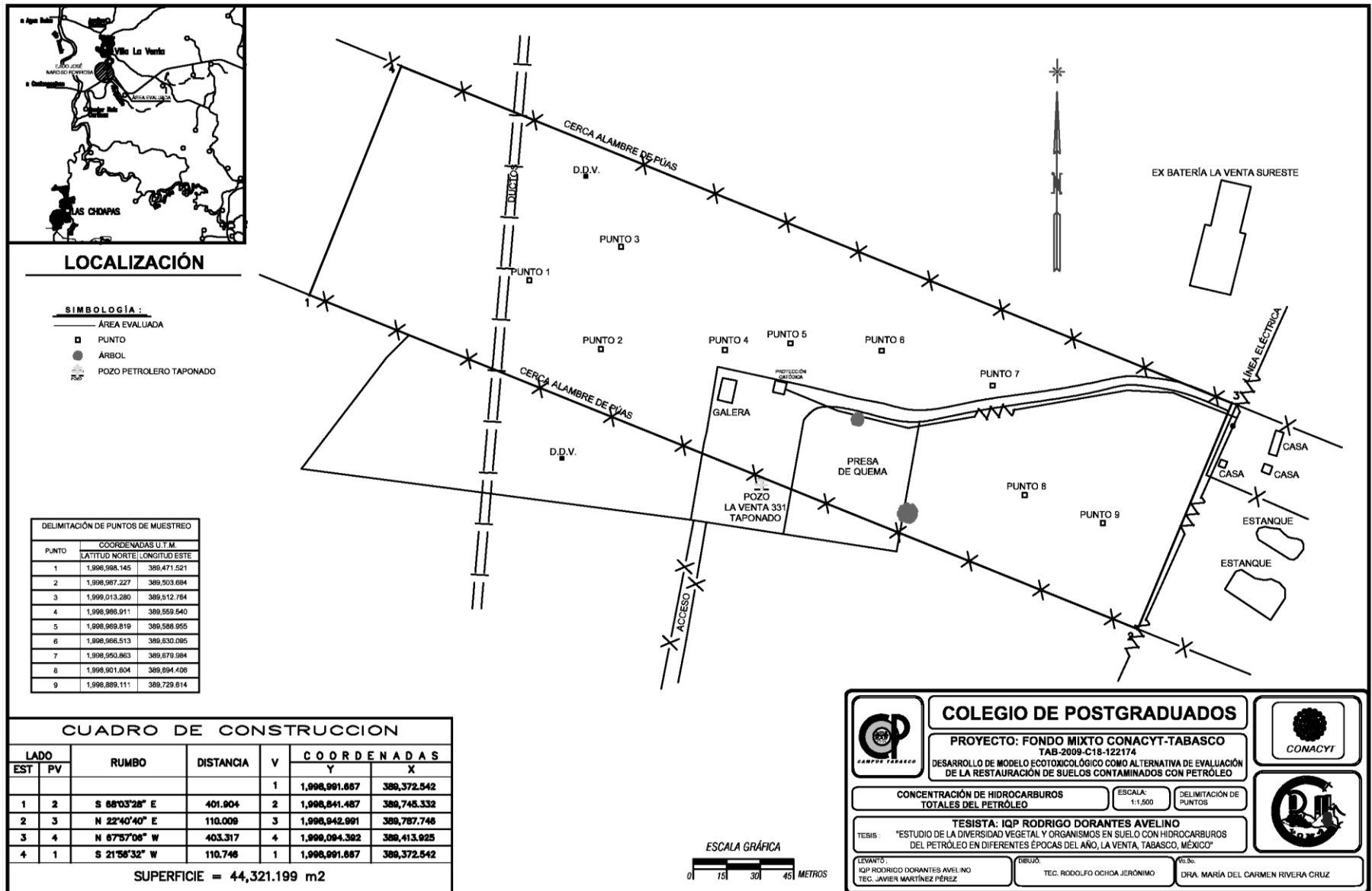


Figura 10. Ubicación de puntos de muestreo el ejido José Narciso Rovirosa, La Venta, Huimanguillo, Tabasco.

5.3. Análisis de laboratorio

El análisis de las propiedades físicas, químicas y biológicas se realizó en el Laboratorio de Microbiología Ambiental Campus-Tabasco y en el Laboratorio del INIFAP (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias). Se procesaron muestras de follaje vegetal, suelo y rizósfera de cada una de las especies vegetales localizadas el 30 de Septiembre de 2009 (época de lluvias), el 30 de Enero de 2010 (época de nortes) y el 30 de Abril de 2010 (época de seca).

5.3.1. Análisis físicos y químicos del suelo

Los análisis de las variables físicas y químicas del suelo se realizaron de acuerdo con las rutinas analíticas indicadas en la NOM-021-RECNAT-2000 (DOF, 2002), para la textura, potencial hidrógeno, nitrógeno total y fósforo total, mientras que la materia orgánica y el carbón orgánico se cuantificaron mediante la metodología descrita por Nelson and Sommers (1982); los hidrocarburos totales del petróleo se extrajeron mediante el método 3540C modificado (EPA, 1996) y se cuantificaron por gravimetría con el procedimiento adaptado de la NMX-AA-134-SCFI-2006 (Consuegra, 2006).

5.3.1.1. Textura

La textura del suelo se cuantificó por el procedimiento de Bouyoucos indicado en el método AS-09. Se pesó 50 g de suelo seco en un vaso de precipitados de 250 mL, se le agregó 5 mL de oxalato de sodio y 5 mL de hexametáfosfato de sodio, posteriormente se agitó y se traspasó a una probeta graduada de 1000 mL.

Se agitó durante un minuto y después de 40 s y a las dos horas se tomó la lectura con el hidrómetro para suelos tipo ASTM 152H y la temperatura con un termómetro marca Taylor, con rango de -20 a 110 °C, para corregir las lecturas del hidrómetro. Los resultados se expresaron como porcentaje de arena, arcilla y limo para determinar la clase textural de cada punto con el triángulo de texturas propuesto por la USDA (United States Department of Agriculture) (DOF, 2002) (Figura 3).

5.3.1.2. Potencial hidrógeno

Para la determinación del potencial hidrógeno (pH) (acidez o alcalinidad del suelo) se siguió el procedimiento indicado en el método AS-02 de la NOM-021-RECNAT-2000 (DOF, 2002), se utilizó un potenciómetro de la marca Hanna Instruments, modelo HI8424. Se pesó 10 g de suelo seco en un frasco de vidrio utilizando una balanza analítica, se le adicionó 20 mL de agua destilada con ayuda de una pipeta graduada, se agitó durante 30 minutos con una varilla de vidrio, se introdujo el potenciómetro en la solución y se cuantificó el potencial hidrógeno.

5.3.1.3. Materia orgánica y carbón orgánico

La materia orgánica del suelo se cuantificó por el método gravimétrico de acuerdo a la metodología descrita por Nelson and Sommers (1982). Se pesó 5 g de suelo seco en un crisol dentro de una balanza analítica, se introdujo en una mufla marca Felisa a la temperatura de 450 °C durante 24 h, posteriormente, se introdujo el suelo calcinado a un desecador y se pesó en una balanza analítica, marca vibra con precisión de 0.0001 g. se realizó toda esto con el fin de estimar el carbono orgánico (C org) como lo indica Nelson and Sommers (1996), dividiendo la materia orgánica entre un factor de conversión de 1.724, basado en la suposición que la materia orgánica contiene 58 % de carbón orgánico.

5.3.1.4. Nitrógeno total

El nitrógeno (N) total en suelo se realizó mediante el método AS-25 descrito en la NOM-021-RECNAT-2000 (DOF, 2002), siguiendo el procedimiento micro-Kjeldahl. Se utilizó suelo tamizado en malla 60, del cual se tomó 0.25 g al que se le agregó 1.1 g de mezcla de catalizadores K_2SO_4 , 3 mL de ácido sulfúrico concentrado. Se puso a ebulir la muestra por lapso de una hora a partir de que se tornó claro en la unidad digestora. Una vez terminado lo anterior, se dejó enfriar el frasco y se le agregó suficiente agua para colocar las partículas en suspensión mediante agitación. Se decantaron las partículas de sílice evitando que se precipitaran los cristales de sulfato de amonio.

Se transvasó el líquido a un matraz Erlenmeyer de 125 mL conteniendo 10 mL de la solución de ácido bórico más indicadores y se instaló en una cámara de destilación. Se le adicionó cuidadosamente 10 mL de hidróxido de sodio 10 normal y se inició la destilación hasta que se alcanzó un volumen de 75 mL. El N amoniacal se determinó mediante titulación con ácido sulfúrico 0.01 normal, notándose un cambio en el color de verde a rosa fuerte. El resultado se expresó como porcentaje de N total.

5.3.1.5. Fósforo total

La determinación del fósforo (P) disponible se realizó mediante el método AS-11 descrito en la NOM-021-RECNAT-2000 (DOF, 2002), mediante el procedimiento de Bray y Kurtz 1. Se tamizó el suelo en malla de 2 mm. Se pesó 2.5 g de suelo y se colocó en un tubo de polietileno de 50 mL. Se le adicionó 25 mL de la solución extractora, se agitó la suspensión en un agitador de acción recíproca, regulado a 180 oscilaciones por minuto, durante cinco minutos. El extracto se filtró mediante un papel Whatman No. 42. De la solución filtrada se tomó una alícuota de 10 mL y se colocó en un matraz aforado de 50 mL. Se le adicionó agua hasta completar los 40 mL restantes. Se le agregó 5 mL de la solución reductora y se agitó. Se esperó durante 30 minutos y se leyó la intensidad de absorción de luz a 882 nm (nanómetros).

Para la preparación de la curva de calibración se utilizó puntos de referencia de 0, 1, 2, 3, 4 y 5 mg L⁻¹ de fósforo. Para esto, se colocaron en matraces aforados de 50 mL, 0, 5, 10, 15, 20 y 25 mL de la solución de 10 mg L⁻¹ de fósforo. Se le adicionó un volumen de la solución extractante igual a la alícuota empleada para medir las muestras conocidas, se llevó a aproximadamente 40 mL con agua, adicionándole 5 mL de la solución reductora y se agitó. Se esperó durante 30 minutos y se interpretó la intensidad de absorción de luz a 882 nm. El resultado se expresó en mg kg⁻¹ de suelo.

5.3.1.6. Extracción y cuantificación de los hidrocarburos totales del petróleo

Los contenidos de hidrocarburos totales del petróleo (HTP) se evaluó en los suelos húmedos colectados para un día específico dentro de la época de lluvia, nortes y seca. Se realizó en tres fases; preparación de muestras, extracción y cuantificación. Se pesó 10 g de muestra húmeda, la cual se colocó en cartuchos de papel filtro marca Whatman número 42. La extracción se realizó en equipo soxhlet (EPA, 1996) con 110 mL de diclorometano (EMD, EM-DX0835-5, 84.93 % de pureza, CAS 75-09-2), el reflujo se mantuvo durante 8 h y el sistema de enfriamiento se conservó a la temperatura de 4 °C con un equipo de refrigeración en circulación de la marca VWR International. La cuantificación se realizó gravimétricamente (Consuegra, 2006).

5.3.2. Organismos del suelo y rizósfera

Los organismos del suelo que se determinaron en esta investigación fueron; macrofauna y microflora. En rizósfera de cada especie vegetal se determino microflora.

5.3.2.1. Macrofauna

En la búsqueda de la macrofauna del suelo en cada punto se utilizó la metodología propuesta por el programa Tropical Soil Biology and Fertility (TSBF), que consta en extraer del suelo monolitos de 25x25x30 cm (Anderson and Ingram, 1993).

Cada monolito se desintegró en bloques más pequeños, la macrofauna encontrada se depositó en frascos etiquetados con alcohol al 70 %, para su respectiva clasificación a nivel de orden, los resultados se expresaron como número de individuos por orden presentes en cada punto para un día específico de cada época del año. Se clasificaron en Filo, Clase y Orden utilizando la guía propuesta por Borror y White (1970).

5.3.2.2. Microflora

La microflora incluyó a las poblaciones de bacterias fijadoras de N atmosférico de vida libre (BFN), las bacterias solubilizadoras de fosfatos (BSP), las bacterias solubilizadoras de potasio (BSK) y los hongos heterótrofos (HH) en muestras de suelo a distancia y suelo rizosférico para cada especie vegetal (Cuadro 4). El número de especies vegetales fueron; 12, 6 y 8 en el día específico de la época de lluvias, nortes y seca respectivamente. En la cuantificación de la microflora para el suelo a distancia y suelo rizosférico de plantas se utilizó la metodología descrita por Madigan *et al.* (2004), mediante el conteo de células viables en caja petri, por dilución seriada.

Los medios de cultivo selectivos fueron:

Para BFN [Solución A: K_2HPO_4 0.8 g; KH_2PO_4 0.2 g; $NaCl_2$ 0.1 g; NaFeEDTA 0.028 g; $Na_2MoO_4 \cdot 2H_2O$ 0.025 g; Extracto de levadura 0.025 g; Manitol 5 g; Sacarosa 5 g; Lactato de sodio 0.5 mL; Agua destilada 900 mL; Solución B: $MgSO_4$ 0.2 g; $CaCl_2$ 0.06 g; Agua destilada 100 mL; pH 7 en el medio de cultivo] (Rennie, 1981).

Para BSP [Glucosa 10 g; $Ca_3(PO)_4$ 5 g; $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ 0.1 g; Agar 15 g; KCl 0.2 g; $(NH_4)SO_4$ 0.5 g; Extracto de levadura 0.5 g; $MnSO_4$ 0.002 g; Agua destilada 1000 mL] (Wu *et al.*, 2005; Guang-Can *et al.*, 2008).

Para BSK [Sacarosa 5 g; Na_2HPO_4 2 g; $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ 0.5 g; $FeCl_3$ 0.005 g; $CaCO_3$ 0.1 g; polvo de vidrio 1 g; Agar 20 g; Agua destilada 1000 mL] (Qi-Mei *et al.*, 2002; Wu *et al.*, 2005).

Para HH se utilizó [Papa dextrosa agar] (Johnson y Curl, 1972).

Los materiales, medios de cultivos, frascos con 90 mL de agua estéril, tubos de dilución con 9 mL de agua, se esterilizaron en autoclave durante 18 minutos a 1.3 kg cm^{-2} . La dilución seriada se realizó de la siguiente manera: se mezcló 10 g de suelo a distancia y/o suelo rizosférico en su respectivo frasco de dilución con 90 mL de agua destilada y esterilizada, después se agitó a 150 rpm en una agitadora mecánica con movimiento lineal durante 15 minutos, en seguida se tomó con una micropipeta una alícuota de 1 mL del inóculo, se introdujo en un tubo de dilución con 9 mL de agua destilada y esterilizada, se agitó en vortex durante 30 s, se tomó una alícuota del tubo de dilución y se introdujo en otro tubo de dilución (10^1), y así sucesivamente se realizaron las demás diluciones seriadas (10^2 , 10^3 , 10^4 , 10^5 , etcétera) hasta obtener las de interés.

Con una micropipeta se transfirió 0.1 mL del tubo de dilución al centro de la caja Petri con el medio de cultivo respectivo, la alícuota se dispersó en forma homogénea por toda la caja con una espátula trigalsqui (varilla de vidrio en forma de L), las cajas Petri se incubaron a la temperatura de $28 \text{ }^\circ\text{C}$ durante 48 h para las BFN, BSP, BSK y 72 h para HH. Se reportaron en unidades formadoras de colonias por gramo de suelo seco ($\text{UFC g}^{-1} \text{ s.s.}$) y suelo rizosférico seco ($\text{UFC g}^{-1} \text{ s.r.}$).

5.3.3. Análisis en plantas

Las variables evaluadas en las especies vegetales fueron la producción de biomasa aérea seca, la cobertura vegetal, el índice de Simpson y la identificación taxonómica de cada planta mostrada en el Cuadro 4.

5.3.3.1. Biomasa aérea seca y cobertura vegetal

La biomasa aérea se colectó de cada especie vegetal localizada en cada punto de muestreo para un día específico de cada época del año (Cuadro 4), se utilizó un cuadro de madera de 1 m^2 , se cortó con un machete toda la vegetación presente dentro del cuadro desde la base del tallo, de acuerdo a lo descrito por Daubenmire (1959).

La biomasa aérea se reportó como el peso seco en gramos por metro cuadrado (g m^{-2}) por punto de muestreo, mientras que la cobertura de cada especie vegetal se determinó utilizando el peso de la especie vegetal entre la biomasa aérea seca por punto de muestreo y día específico dentro de cada época del año.

5.3.3.2. Índice de Simpson

La estimación del índice de Simpson se realizó siguiendo la metodología descrita por Moreno (2001), que consiste en dividir cada especie vegetal entre el número total de especies encontradas en cada punto de muestreo por día específico en cada época del año. Este índice permite conocer la representatividad de las especies vegetales con mayor valor de importancia.

Cuadro 4. Especies vegetales presentes en cada época del año.

Especie vegetal	Época de lluvia	Época de nortes	Época de seca
Pasto alemán	X		
Pasto arrocillo	X		
Cebollín	X		X
Pasto egipcio	X		
Flor morada	X		X
Pasto japonesa	X	X	X
Pasto salisaca	X		
Tule	X	X	X
Tulillo	X	X	X
Pasto de hoja ancha	X	X	
Zacatillo	X	X	X
Camalote	X		X
Hoja de laguna		X	
Pasto alfombra			X

5.3.3.3. Identificación taxonómica

Se identificaron taxonómicamente a nivel de familia las especies vegetales mostradas en el Cuadro 4. Con claves taxonómicas de la Flora de Veracruz, disponible en (<http://www1.inecol.edu.mx/floraver/>).

Dichas claves taxonómicas se basan en diversas características, como por ejemplo las formas de vida (si son arboles, arbustos, hierbas, musgos/líquenes, y acuáticos); por el tipo de hoja (por ejemplo., hojas en forma de aguja o de hoja ancha); por la persistencia del follaje (por ejemplo., hojas caducas o perennes en plantas leñosas y persistentes o no persistentes en hierbas); por el porcentaje de cobertura tomando en cuenta las formas de vida y la altura (por ejemplo., arbustos bajos o arbustos altos), entre muchas otras (Tiner, 1999).

5.4. Análisis matemático y estadístico

El clima basado en la acumulación de precipitación (AP), se obtuvo de la sumatoria diaria del mes de junio a septiembre de 2009 para la época de lluvias, de octubre a diciembre de 2009 y enero de 2010 para la época de nortes y de febrero a mayo de 2010 para la época de seca. Los registros de precipitación diaria de junio de 2009 a mayo de 2010 se obtuvieron de la estación meteorológica ubicada en el ejido General Plutarco Elías Calles, Poblado C-14, H. Cárdenas, Tabasco, México (18° 6' 32.1" N y 93° 37' 44.1" O) reportados en formato digital por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) (Anónimo 2009).

Se realizó el análisis de varianza (ANOVA) y el cálculo de las medias (Tukey, $p \leq 0.05$) para las variables físicas y químicas (pH, C org, N total, P disponible y HTP), microbiológicas en suelo y rizósfera (BFN, BSP, BSK y HH) por punto de muestreo y área evaluada para un día específico de cada época del año (lluvias, nortes y seca). Los datos se analizaron con el procedimiento PROC GLM y la declaración de means del software SAS versión 9.1.3. (SAS, 2005).

SECCIÓN VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de esta investigación se describen mediante tres capítulos, en el capítulo uno se desarrolla y profundiza el comportamiento de la acumulación de precipitación por época del año como principal factor de alteración de las características químicas, plantas y organismos del suelo para efectos de esta investigación. El capítulo dos muestra y describe el estado actual de los puntos de muestreo distribuidos en la superficie evaluada para un día específico de tres épocas del año (lluvias, nortes y seca). El capítulo tres refleja la relación que existe entre la AP y los contenidos de HTP para un día específico de cada época del año en función de variables respuesta para la superficie evaluada.

Capítulo I. Variables meteorológicas durante el período de estudio

En este capítulo se describe y analiza el comportamiento mensual de la AP y temperatura promedio del aire para las tres épocas del año (lluvias, nortes y seca) que se reconocen para el estado de Tabasco. De acuerdo con la clasificación de Köppen, modificada por García (1988), la región del ejido José Narciso Roviroza, se caracteriza por presentar un clima cálido húmedo con abundantes lluvias en verano.

6.1.1. Acumulación de precipitación y temperatura en época de lluvias

En base a los registros meteorológicos, la temporada de lluvias se caracterizó por presentar en el mes de julio una AP de 228 mm y de 135 mm para el mes de junio, observándose una disminución hasta 5.2 mm para el mes de agosto y 3.4 mm para septiembre (Figura 11). Por otra parte, la temperatura promedio mensual del aire en los meses de junio, julio, agosto y septiembre se agrupó en valores que oscilan entre 27.2 y 28.4 °C (Figura 11). Principalmente la AP en el área de estudio provocó un ascenso en promedio de 70 cm en la lámina de agua desde la superficie del suelo (Figura 14a).

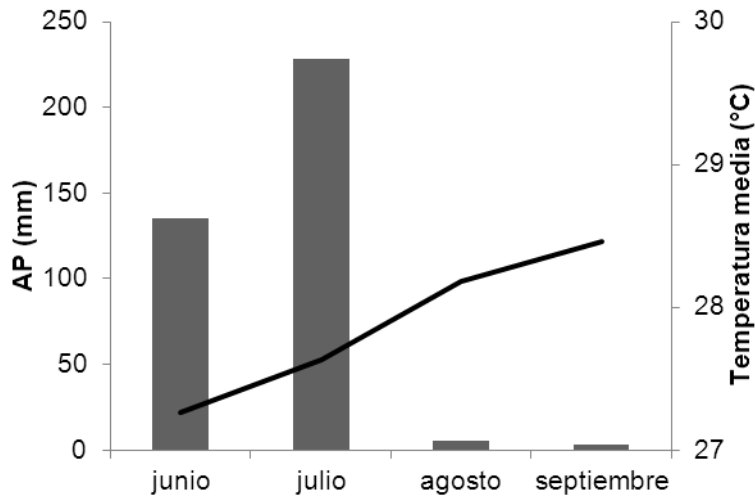


Figura 11. Comportamiento diario de la AP y la temperatura media mensual en la época de lluvias.

6.1.2. Acumulación de precipitación y temperatura en época de nortes

La temporada de nortes presentó altas precipitaciones comparadas con las que se registraron durante la época de lluvias. En el mes de octubre se registró una AP de 431.2 mm, mientras que para el mes de noviembre la AP fue el dos veces más que la registrada en octubre, sin embargo para el mes de diciembre la AP descendió hasta 257.8 mm y en el mes de enero se registró una AP de 526.8 mm (Figura 12). Todo esto trajo como consecuencia el desbordamiento del Río Tonalá, localizado en la región, lo que provocó el aumento del nivel superficial del agua hasta una altura promedio de 200 cm, específicamente en el área evaluada (Figura 14b). En cambio, la temperatura promedio mensual presentó valores de 22.96 °C para el mes de enero y de 28.98 °C para el mes de diciembre, a lo cual este aumento en la temperatura puede deberse a la evaporación del agua superficial (Figura 12).

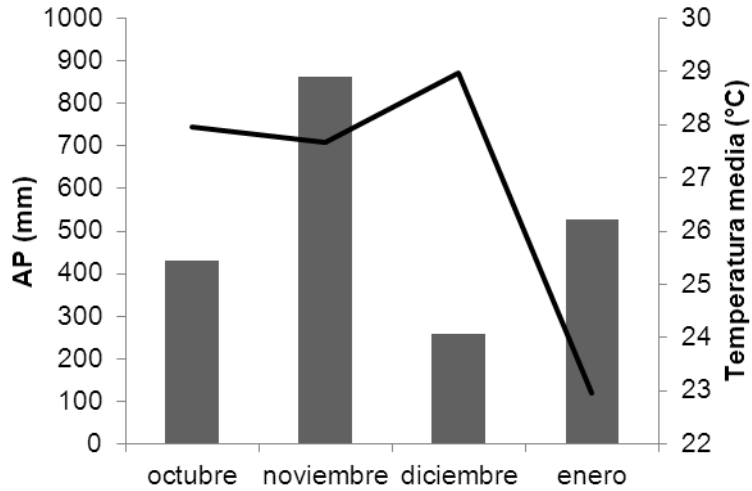


Figura 12. Comportamiento diario de la AP y la temperatura media mensual en la época de nortes.

6.1.3. Acumulación de precipitación y temperatura en época de seca

La época de seca presentó bajas precipitaciones, menores a las observadas en la época de lluvias y nortes. En la Figura 13, se muestra que las precipitaciones máximas fueron de 27.2 mm para el mes de febrero y de 0.4 mm para el mes de mayo. Estas precipitaciones indujeron un déficit hídrico del suelo, lo que limitó la producción de biomasa para un mejor desarrollo pecuario (Figura 14c). Aunado a esto la temperatura promedio mensual presentó valores desde 22 °C en el mes de febrero, hasta 29.62 °C para el mes de mayo, lo que representó un efecto inverso a la AP para el mes de abril y mayo (Figura 13).

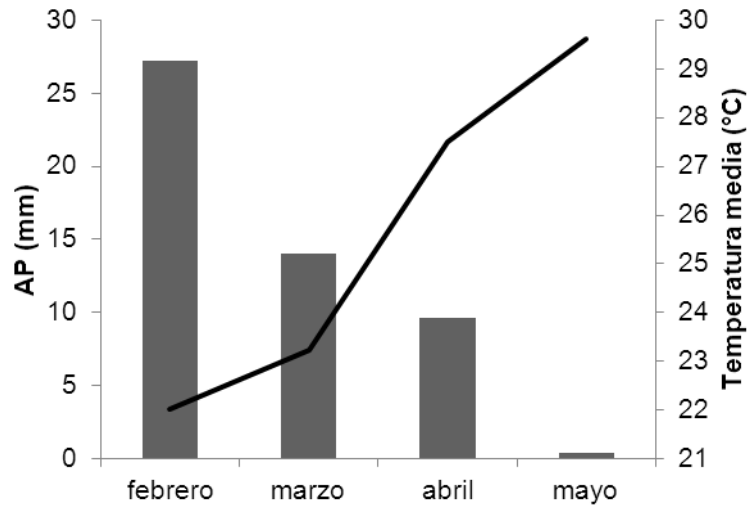


Figura 13. Comportamiento diario de la AP y la temperatura media mensual en la época de seca.

Capítulo II. Estado actual de variables respuesta en nueve puntos de muestreo para un día específico de cada época del año

6.2.1. Partículas del suelo y clase de textura

La clase textural de los nueve puntos se resalta en el Cuadro 5, donde se muestra que el P1 para el 30 de septiembre de 2009 (época de lluvias) y 30 de abril de 2010 (época de sequía) la clase de textura fue arcillosa, pero en el 30 de enero del 2010 (época de nortes) presentó un cambio a textura franca. Sin embargo, el P2 para los días antes mencionados de las tres épocas del año presentó una textura arcillosa.

El P3 para el día específico de la época de lluvias reflejó una textura franca, representada por altos contenidos de arena (40 %), pero el DM de la época de nortes evidenció una disminución de 6 % el contenido de arena, respecto al día en que se efectuó el muestreo en época de lluvias, lo cual dio origen a una textura franca arcillosa. En tanto, que el DM en la época de seca se encontró un contenido de arena de 19 % y un aumento del contenido de arcilla, lo que permitió que clasificara como textura arcillosa. La textura arcillosa del P4 fue análoga al DM en la época de lluvias y seca, diferenciándose por un incremento en las partículas de arena (30 %) durante el DM en la época de nortes, lo que originó la clasificación de una textura franco arcilloso. El P5 presentó una textura arcillosa para el DM de las tres épocas del año (lluvias, nortes y seca) (Cuadro 5).

La textura arcillosa del P6 en el DM para la época de lluvia, evidenció cambios en los porcentajes de arena, limo y arcilla, lo que dio origen a la textura franco arcillo arenosa el DM en la época de nortes, con una reducción de los contenidos de arena para el día específico de la época de seca, clasificándose como una textura arcillo limosa.

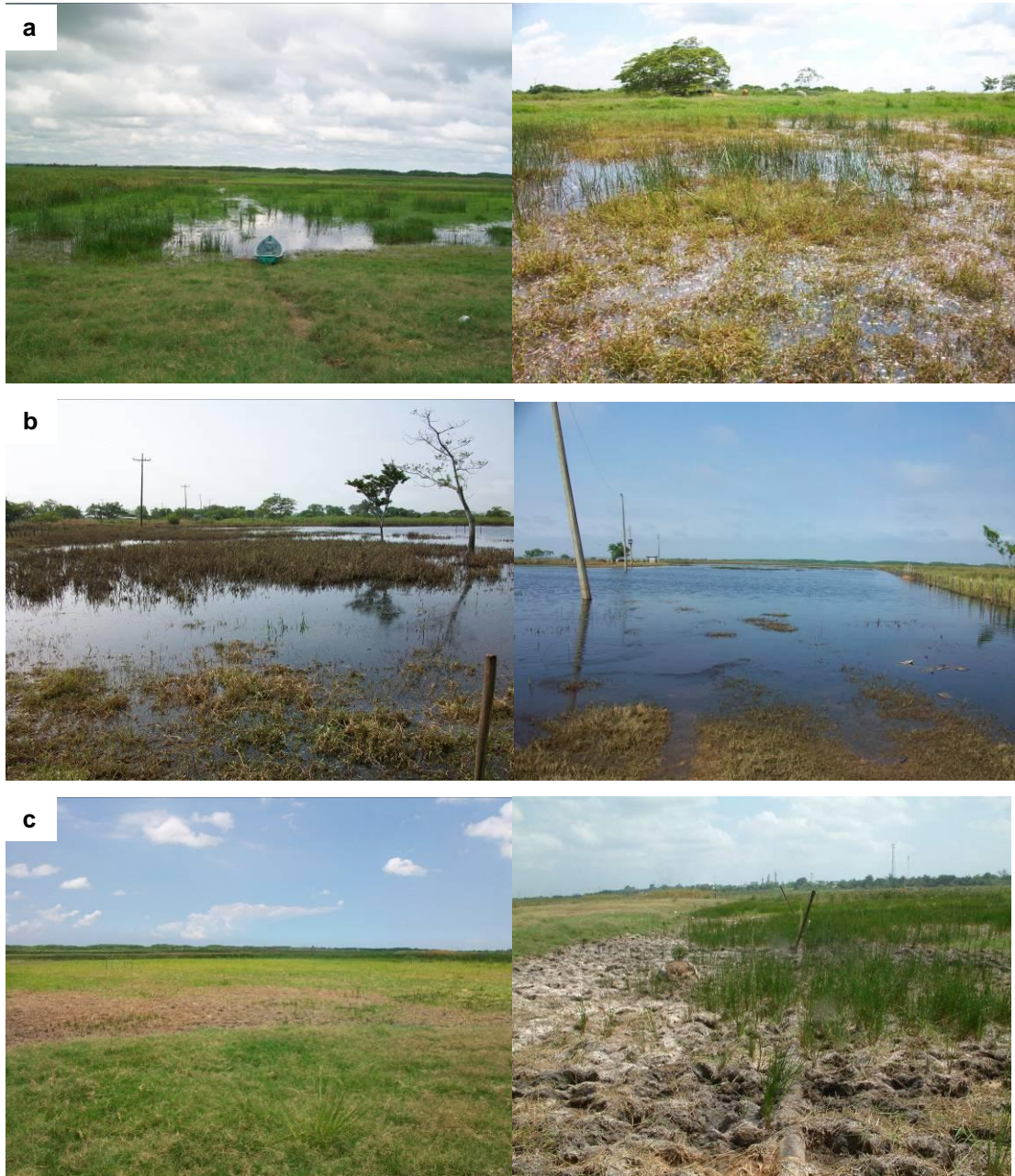


Figura 14. Panorámica del sitio de estudio el día: a) 30 de septiembre de 2009 (época de lluvia), b) 30 de enero de 2010 (época de nortes) y c) 30 de abril de 2010 (época de seca).

El DM de la época de lluvia en el P7 mostró una textura arcillo arenosa, pero la adición de partículas de arena para el DM de la época de nortes provocó que la textura se clasificara como franco arcillo arenosa, presentando cambios en los contenidos de arena para formar una textura franca el DM de la época de seca (Cuadro 5).

El P8 del DM en la época de lluvias presentó una textura arcillosa, la cual cambió a franco arcilloso, debido a la adición de partículas de arena para el DM en la época de nortes. Las partículas de arena mostraron una disminución para presentar una textura franco limoso durante el DM de la época de seca. La textura franco arcillosa fue similar en el P9 para el DM en la época de lluvia y nortes, pero el DM de la época de seca presentó una textura franca (Cuadro 5).

En el Cuadro 5 se observa que los contenidos de arena en suelo aumentaron en ocho puntos de los nueve evaluados, estos aumentos corresponden al orden de 2.04 (P1), 1.04 (P2), 3.75 (P4), 3.43 (P5), 4.31 (P6), 1.19 (P7), 1.89 (P8) y 1.2 (P9) veces el DM en la época de nortes respecto al DM en la época de lluvias.

Las disminuciones en los contenidos de partícula gruesa (arena) el DM en la época de seca, respecto al DM de la época de nortes, fueron de 2.76 (P1), 1.28 (P2), 1.80 (P3), 6 (P4), 1.85 (P5), 6.22 (P6), 1.19 (P7) y 1.03 (P8) (Cuadro 5). Este proceso de arrastre, deposición y dispersión de partícula gruesa posiblemente se debe a que el sitio en donde se ubican los puntos de muestreo es un área receptora de agua y sólidos suspendidos, inducidas por las altas precipitaciones que ocurrieron en el mes de noviembre de 2009 (862.4 mm) (Figura 12), y el desbordamiento del río Tonalá, ubicado entre los estados de Veracruz y Tabasco, lo que supone que las partículas de arena fueron depositadas en otro sitio posterior cuando la lamina de agua bajó.

En cambio, autores como Calva-Benítez *et al.* (2006) han encontrado que las corrientes de agua arrastran y dispersan parte del sedimento arenoso depositado en un manglar, tras alcanzar en un período de cinco días 1,200 mm de precipitación durante una tormenta tropical. Así como las proporciones arena-arcilla disminuyen conforme se aumenta el número de días inundados por año (Bennett y Simon, 2004).

Las partículas de limo del suelo presentaron aumentos en seis puntos de los nueve evaluados el DM en la época de nortes, respecto DM en la época de lluvias, mientras que en el P3 y P9 no hubo ninguna alteración, lo mismo sucedió en el P4 y P5 del DM en la época de seca, respecto al DM de la época de nortes. En cuanto a las partículas de arcilla presentes el DM en la época de nortes, respecto al DM en la época de lluvias presentó una disminución en ocho de los nueve puntos evaluados, estas disminuciones se encuentran íntimamente relacionadas con los aumentos en los contenidos de arena para los mismos días de muestreo en las tres épocas del año (Cuadro 6).

Estos cambios en la textura del suelo en el sitio de estudio para los nueve puntos de muestreo pueden estar relacionados con lo descrito por Trujillo-Narcía *et al.* (2006) quienes afirman que después de que se efectuó la restauración *on site* del suelo contaminado se formó un área receptora de agua con un nivel de suelo inferior al original. Al respecto, Rivera-Cruz *et al.* (2002a) durante el 2001 encontraron que en el horizonte de 0-15 cm se presentó una textura limosa, mientras que en el año 2002 se encontró que la textura en toda el área era franco arcillosa (Rivera-Cruz y Trujillo-Narcía, 2004).

Cuadro 5. Partículas de suelo y clase de textura de nueve puntos de muestreo para un día específico por época del año.

Punto	Partícula del suelo			Clase textural
	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	
P1				
Lluvia	23	37	40	Arcillosa
Nortes	47	41	12	Franca
Seca	17	39	44	Arcillosa
P2				
Lluvia	26	27	48	Arcillosa
Nortes	27	30	43	Arcillosa
Seca	21	48	31	Arcillosa
P3				
Lluvia	40	33	28	Franca
Nortes	34	33	33	Franca arcillosa
Seca	19	29	52	Arcillosa
P4				
Lluvia	8	29	64	Arcillosa
Nortes	30	31	39	Franca arcillosa
Seca	5	31	64	Arcillosa
P5				
Lluvia	7	29	64	Arcillosa
Nortes	24	33	43	Arcillosa
Seca	13	33	54	Arcillosa
P6				
Lluvia	13	37	50	Arcillosa
Nortes	56	19	26	Franco arcillo arenosa
Seca	9	41	50	Arcillo limosa
P7				
Lluvia	47	15	38	Arcillo arenosa
Nortes	56	19	26	Franco arcillo arenosa
Seca	47	41	12	Franca
P8				
Lluvia	19	33	48	Arcillosa
Nortes	36	35	30	Franco arcillosa
Seca	21	57	22	Franco limosa
P9				
Lluvia	25	37	38	Franco arcillosa
Nortes	30	37	33	Franco arcillosa
Seca	31	22	47	Franca

6.2.2. Potencial hidrógeno

El pH del suelo en los nueve puntos para un día específico por época del año presentó diferencias estadísticas significativas (Tukey, $p \leq 0.05$) (Figura 15). De acuerdo a la clasificación descrita en la NOM-021-RECNAT-2000 (DOF, 2002), los suelos de los nueve puntos presentan un pH fuertemente ácido (< 5).

Estadísticamente los mayores valores de pH el DM en la época de lluvia (A1, Cuadro 1) y el DM en época de nortes (A2, Cuadro 22) se encontraron en el P5 con 4.21 y 4.73 respectivamente, pero el DM en la época de sequía el suelo del P4 fue el mayor con 4.63 (Cuadro 6) (A3, Cuadro 43).

Cuadro 6. Variación de las partículas del suelo por punto de muestreo para un día específico de cada época del año.

Punto	Partícula del suelo/Época del año					
	Arena		Limo		Arcilla	
	LI – N [¶]	N – S [¶]	LI – N	N – S	LI – N	N – S
1	+2.04 [†]	-2.76	+1.11	-1.05	-3.33	+3.67
2	+1.04	-1.28	+1.11	+1.6	-1.17	-1.39
3	-1.18	-1.80	0	-1.14	+1.18	+1.58
4	+3.75	-6	+1.07	0	-1.64	+1.64
5	+3.43	-1.85	+1.14	0	-1.49	+1.26
6	+4.31	-6.22	-1.95	+2.16	-1.92	+1.92
7	+1.19	-1.19	+1.27	+2.16	-1.46	-2.17
8	+1.89	-1.71	+1.06	+1.63	-1.6	-1.36
9	+1.2	+1.03	0	-1.68	-1.15	+1.42

[†] Número de veces que aumentan (+) o disminuyen (-) las partículas del suelo por punto de muestreo.

[¶] LI-N: del 30 de septiembre de 2009 (época de lluvias) al 30 de enero del 2010 (época de nortes) y N-S: del 30 de enero del 2010 (época de nortes) al 30 de abril del 2010 (época de seca).

El menor valor de pH para el DM de la época de lluvia y en base al análisis estadístico (Tukey, $p \leq 0.05$) se presentó en el P3 con 3.38, mientras que el DM para la época de nortes se localizó en el P1 con 3.94 y en el P9 con un valor de 3.5 para el DM de la época de seca (Cuadro 7). Resultados similares se encontraron en el mismo sitio durante una evaluación realizada por Rivera-Cruz *et al.* (2005) donde el pH presentó valores de 4.2 y 5.0. De igual forma en el municipio de Minatitlán, Veracruz, se encontraron niveles de pH de 4.2 en el horizonte de 0-25 cm de profundidad (Hernández-Acosta *et al.*, 2006).

Estos valores fuertemente ácidos del suelo, como los encontrados en los nueve puntos distribuidos por toda la superficie evaluada en el ejido José Narciso Rovisora, La Venta, Tabasco, al parecer son una limitante en la disponibilidad de nutrimentos para la planta, tal como lo señala Zeiger y Taiz (2007), quienes mencionan que el pH afecta al crecimiento de las raíces vegetales, así como la microflora del suelo. Lo anterior es corroborado por Okonokhua *et al.* (2007), quienes encontraron que valores de pH en el rango de 4.5 a 4.7 influyen sobre la disponibilidad de elementos minerales para la asimilación por parte de la planta. Sin embargo, en esta investigación se observa que en los nueve puntos evaluados para el día específico de cada época de muestreo, se desarrollan diversas plantas, entre ellas principalmente las gramíneas, las cuales se han adaptado a estas condiciones del suelo.

Por otra parte, en suelo restaurado en presencia de 11,000 mg kg⁻¹ de HTP, se ha reportado un pH moderadamente ácido (5.23) después de haber sembrado rábano (*Raphanus sativus* L.) y muy pocas variaciones respecto al suelo testigo (De la Cruz, 2008). Asimismo, un estudio realizado por Martínez y López (2001), evidenciaron que un suelo arcilloso sometido a contaminación con dosis de 100 a 150,000 mg kg⁻¹ de gasolina y diesel, producen efectos mínimos en las modificaciones del pH del suelo.

6.2.3. Carbono orgánico

Los contenidos de C org en suelo de los nueve puntos presentó altas diferencias estadísticas significativas (Tukey, $p \leq 0.05$) (Cuadro 7) por efecto de su ubicación en el sitio de estudio. El contenido de C org de acuerdo a su distribución en el plano de la Figura 10, se encontró que al noroeste del pozo taponado La Venta 331, se ubican el P1, P2 y P3, los cuales mostraron un decremento en el orden de 1.16, 1.5 y 2.05 veces los contenidos de C org del DM en la época de nortes, respecto al DM en la época de lluvias, respectivamente. Logrando un ascenso de 1.15 y 1.17 veces en el P2 y P3 el DM de la época de seca, respecto al DM de la época de nortes.

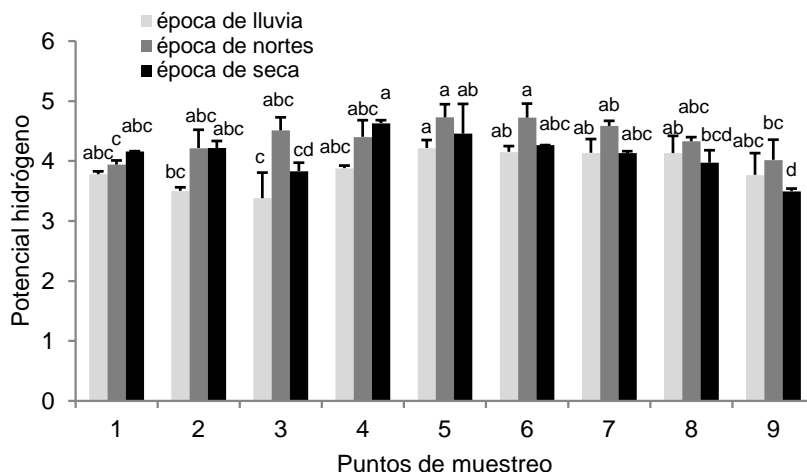


Figura 15. Potencial hidrógeno de los puntos de muestreo para un día específico de cada época del año.

Los P4, P5, P6 y P7 localizados al norte y noreste de la presa de quema y del pozo taponado La Venta 331 (Figura 10), mostraron una disminución del C org en el orden de 1.29, 1.5, 1.06 y 1.05 del DM en la época de nortes, respecto al DM en la época de lluvias, pero del DM en la época de seca, respecto al DM de la época de nortes se acentuó un incremento del C org en el suelo del P4, P5 y P7 en 1.14, 1.64 y 1.33 veces, mientras que el P6 disminuyó 1.06 veces.

El P8 que se ubica al oeste de la casa-habitación del dueño del terreno se observó que el C org aumentó 1.17 veces y el P9 disminuyó 1.27 veces desde el DM en la época de nortes, respecto al DM en la época de lluvias, sucediendo lo contrario del DM en la época de seca, respecto al DM en la época de nortes, es decir, el P8 disminuyó 1.5 veces y el P9 aumentó 1.27 veces.

Lo anterior muestra la gran redistribución heterogénea de los contenidos de C org en el suelo del área evaluada (44,321.199 m²). La disminución acentuada del DM de la época de nortes, respecto al DM de la época de lluvias, posiblemente se debe al efecto que provocó el aumento de la lámina de agua (200 cm sobre la superficie del suelo) durante el mes de noviembre del 2009 (Figura 12), y al arrastre de partes orgánicas suspendidas en el agua y sedimentadas en el suelo superficial.

Al respecto, Beltrán-Paz (2006) en estudio realizado en suelos de La Venta, Tabasco, en época de lluvias, observó que el material orgánico se depositó en las zonas bajas del sitio por efecto de las corrientes de agua. Así, la acumulación de C org en estos suelos está influenciada por el tipo de hidrología, por las condiciones climáticas y de inundación, así como por las especies de vegetación que lo constituyen (Olguín *et al.*, 2007), transportándose en forma disuelta o mediante partículas suspendidas.

En cambio, estadísticamente (Tukey, $p \leq 0.05$), se observó que el mayor contenido C org se localizó en el suelo del P3 (24.10 %) para el DM en la temporada de lluvias (A1, Cuadro 2), pero el DM en la época de nortes en el P8 presentó 12.61 % de C org (A2, Cuadro 23), mientras que el DM para la época de sequía el P7 mostró la mayor formación de C org (16.75 %) (A3, Cuadro 44). En la actualidad, se ha encontrado que después de siete años de haber ocurrido un derrame, los compuestos de hidrocarburos en suelos con bajas concentraciones de C org puede tener mayor oportunidad para la degradación que en suelos con altos contenidos de C org (Gunderson *et al.*, 2008). Por otra parte Wyszowski y Ziółkowska (2008), observaron que cuando se incrementa la concentración de petróleo y diesel en el suelo, se refleja una importante reducción en el contenido de C org.

Cuadro 7. Efecto comparativo de pH y C org en suelo de los nueve puntos para un día específico de tres épocas del año.

Punto de muestreo	Época del año					
	Lluvias [†]		Nortes [‡]		Seca [‡]	
	pH	C org	pH	C org	pH	C org
1	3.78 abc [†]	13.27 c	3.94 c	11.27 bc	4.16 abc	11.35 c
2	3.50 bc	15.90 b	4.21 abc	10.84 bc	4.22 abc	12.75 b
3	3.38 c	24.10 a	4.51 abc	11.79 ab	3.83 cd	13.43 b
4	3.88 abc	10.98 d	4.40 abc	8.29 d	4.63 a	9.31 de
5	4.21 a	12.30 c	4.73 a	8.62 d	4.46 ab	13.72 b
6	4.15 ab	10.95 d	4.72 a	10.27 c	4.27 abc	9.53 d
7	4.13 ab	13.21 c	4.58 ab	12.58 a	4.13 abc	16.75 a
8	4.13 ab	10.65 d	4.33 abc	12.61 a	3.97 bcd	8.33 de
9	3.77 abc	8.15 e	4.02 bc	6.80 e	3.50 d	8.21 e

[†] Medias con diferente letra dentro cada columna muestran diferencias estadísticas (Tukey, $p < 0.05$).

[‡] Hace referencia al 30 de septiembre de 2009 (lluvias), 30 de enero del 2010 (nortes) y 30 de abril del 2010 (seca).

6.2.4. Nitrógeno total

El N total del suelo por punto dentro del DM para cada época del año evidenció diferencias estadísticas significativas (Tukey, $p \leq 0.05$) (Cuadro 8). Analizando el N total conforme a la ubicación de los puntos en el plano (Figura 10), se tiene que el P1, P2 y P3 que se ubican al noroeste de la presa de quema y del pozo taponado La Venta 331, los cuales presentaron una disminución en el orden de 1.72, 1.28 y 1.55 veces el DM de la época de nortes, respecto al DM de la época de lluvias, respectivamente. Pero del DM en la época de seca, respecto al DM en la época de nortes el P1 evidenció un aumento de 1.11 veces, mientras que el P2 y P3 disminuyeron 1.19 y 1.21 veces para los mismos días de muestreo en las épocas antes mencionadas.

Al norte y noreste del pozo taponado La Venta 331 y de la presa de quema se encuentra el P4, P5 y P7 quienes presentaron un descenso en el orden de 2.23, 1.2 y 1.34 veces, pero el P6 tuvo un aumento de 1.17 veces del DM en la época de nortes, respecto al DM en la época de lluvias, sin embargo, del DM en la época de seca, respecto al DM en la época de norte el P4 y P6 reflejaron una disminución de 1.62 y 1.05 veces, mientras que para los mismos días de muestreo en estas épocas el P5 y P7 mostraron un aumento de 1.8 y 2.43 veces, lo que permitió observar una redistribución del N total.

Al oeste de la casa del dueño se ubican el P8 quien disminuyó 1.43 veces y aumentó el P9 en 1.07 veces del DM en la época de nortes, respecto al DM de la época de lluvias, mientras que del DM de la época de seca, respecto al DM en la época de nortes se observó un ascenso de 1.57 y 1.4 veces, lo que puede estar relacionado con que estos puntos se encuentran protegidos por un camino de acceso al pozo taponado La Venta 331, que impide la circulación del agua y sólidos suspendidos, acumulando altos contenidos de N total después estar inundado el sitio de estudio por más de seis meses.

El DM de la época de lluvia, reflejó contenidos muy altos de N total en el P1, P2, P3 y P4, posteriormente dentro del P5, P6, P7 y P8 los contenidos son altos, mientras que el P9 presentó un valor medio, de acuerdo a la clasificación descrita en la NOM-021-RECNAT-2000 (DOF, 2002). Se observó que los contenidos de N total mostraron una tendencia disminuir en el P8 y P9, que se localizan en la parte más alta del área de estudio. Sin embargo, estadísticamente (Tukey, $p \leq 0.05$) el mejor contenido para el DM de la época de lluvia se encontró en el P4 con 0.48 % de N total (A1, Cuadro 3), mientras que el DM de la época de nortes se presentó en el P3 con 0.29 % (A2, Cuadro 24), y para el DM de la época de seca se encontró un contenido de N total de 0.34 % en el P7 (A3, Cuadro 45).

Asimismo, los porcentajes de N total reflejan un descenso en el P2 (0.32 %, 0.25 %, 0.21 %), P3 (0.45 %, 0.29 %, 0.24 %) y P4 (0.48 %, 0.21 %, 0.13 %) desde el DM en la época de nortes, respecto al DM de la época de lluvias y el DM de la época de seca, respectivamente. Estos contenidos de N total en este sitio son similares a los reportados por Hernández-Acosta *et al.* (2006) durante una evaluación realizada en Minatitlán, Veracruz en suelos contaminados con hidrocarburos.

Cuadro 8. Contenidos de nitrógeno total y fósforo disponible por punto de muestreo para un día específico de cada época del año.

Época del año	Punto de muestro	Nitrógeno total (%)	Clasificación	Fósforo disponible (mg kg ⁻¹)	Clasificación
Lluvia [†]	1	0.31d [†]	Muy alta	9.15h [†]	Baja
	2	0.32c	Muy alta	8.39i	Baja
	3	0.45b	Muy alta	10.11f	Baja
	4	0.48a	Muy alta	25.10c	Media
	5	0.18g	Alta	9.60g	Baja
	6	0.18g	Alta	39.90b	Alta
	7	0.19f	Alta	44.80a	Alta
	8	0.20e	Alta	20.00e	Media
	9	0.14h	Media	23.40d	Media
Nortes [‡]	1	0.18d	Alta	14.88g	Baja
	2	0.25b	Muy alta	6.00i	Baja
	3	0.29a	Muy alta	26.00c	Media
	4	0.21c	Alta	23.30e	Media
	5	0.15e	Alta	14.10h	Baja
	6	0.21c	Alta	17.20d	Media
	7	0.14f	Media	23.70d	Media
	8	0.14f	Media	63.80a	Alta
	9	0.15e	Media	33.60b	Alta
Seca [‡]	1	0.20f	Alta	5.80h	Baja
	2	0.21e	Alta	5.80h	Baja
	3	0.24c	Alta	9.40g	Baja
	4	0.13g	Media	13.60e	Baja
	5	0.27b	Muy alta	11.40f	Baja
	6	0.20f	Alta	27.00b	Media
	7	0.34a	Muy alta	67.90a	Alta
	8	0.22d	Alta	14.00d	Baja
	9	0.21e	Alta	15.80c	Media

[†] Medias con diferente letra dentro de la columna por época del año presentan diferencias estadísticas (Tukey, p<0.05).

[‡] Hace referencia al 30 de septiembre de 2009 (lluvias), 30 de enero del 2010 (nortes) y 30 de abril del 2010 (seca).

6.2.5. Fósforo disponible

El P disponible presente en el suelo de los nueve puntos de muestreo evidenció diferencias estadísticas significativas (Tukey, p≤0.05) (Cuadro 8) por efecto de la ubicación en el sitio de estudio. Los puntos ubicados al noroeste del pozo taponado La Venta 331 (Figura 10), mostraron que el P disponible en el P1 y P3 aumentaron en el orden de 1.63 y 2.57 veces, mientras que el P2 disminuyó 1.40 veces el DM en la época de nortes, respecto al DM en la época de lluvias, en cambio, se encontró que en el P1, P2 y P3 los valores del DM en la época de seca, respecto al DM en la época de nortes descendieron en 2.57, 1.03 y 2.77 veces, esto puede deberse a la lixiviación del P hacia el manto freático.

Al norte y noreste del pozo taponado La Venta 331y de la presa de quema se encuentran el P4, P6 y P7 quien mostró una disminución del DM en la época de nortes, respecto al DM en la época de lluvias en el orden de 1.08, 2.32 y 1.89 veces, así como el P5 quien aumentó 1.47 veces.

Por otra parte, el DM en la época de seca, respecto al DM de la época de nortes, el P4 y P5 descendieron 9.7 y 2.7 veces, mientras que los P6 y P7 aumentaron 1.60 y 2.86 veces. Los P8 y P9 que se encuentran al oeste de la casa del dueño del terreno se caracterizaron por presentar un aumento de 3.19 y 1.43 veces el DM en la época de nortes, respecto al DM de la época de lluvias, sucediendo todo lo contrario el DM de la época de seca, respecto al DM de la época de nortes, con una disminución de 49.8 y 2.13 veces los contenidos de P disponible en el suelo para las plantas.

En tanto, para el DM de la época de lluvias, nortes y seca, estadísticamente (Tukey, $p \leq 0.05$), los mayores contenidos de P disponible se localizaron en el P7 (44.80 mg kg^{-1}), P8 (63.80 mg kg^{-1}) y P7 (67.90 mg kg^{-1}), respectivamente, mientras que los menores contenidos se ubicaron en el P2 para el DM de la época de lluvias (8.39 mg kg^{-1}) (A1, Cuadro 4) y nortes (6 mg kg^{-1}) (A2, Cuadro 25), pero el DM de la época de seca (5.80 mg kg^{-1}) el P1 y P2 fueron similares (A3, Cuadro 46). También se encontró que en la época de lluvia el P1 (9.15 mg kg^{-1}), P2 (8.39 mg kg^{-1}), P3 (10.11 mg kg^{-1}) y P5 (9.60 mg kg^{-1}) presentaron contenidos bajos de P disponible (Cuadro 8).

El DM de la época de nortes se vio acentuada por una redistribución del P disponible en los nueve puntos, mostrando los valores más bajos para el P1 (14.88 mg kg^{-1}), P2 (6.00 mg kg^{-1}) y P5 (14.10 mg kg^{-1}). En cambio, para el DM de la época de seca se distingue por presentar más valores bajos que el DM de la época de lluvias y nortes en el P1 (5.80 mg kg^{-1}), P2 (5.80 mg kg^{-1}), P3 (9.40 mg kg^{-1}), P4 (13.60 mg kg^{-1}), P5 (11.40 mg kg^{-1}) y P8 (14.00 mg kg^{-1}), lo cual puede estar relacionado con la lixiviación del P disponible hacia el manto freático.

Los porcentajes de P disponible evidenciaron una tendencia a disminuir en el P2 (8.3 mg kg⁻¹, 6.00 mg kg⁻¹, 5.80 mg kg⁻¹) y P4 (25.10 mg kg⁻¹, 23.30 mg kg⁻¹, 13.60 mg kg⁻¹) del DM en la época de nortes, respecto al DM de la época de lluvias, y en el DM de la época de seca (Cuadro 8).

6.2.6. Hidrocarburos totales del petróleo

Los contenidos de hidrocarburos totales del petróleo (HTP) en el suelo de los nueve puntos evaluados para un día específico de las tres épocas del año; lluvias, nortes y seca mostraron diferencias estadísticas significativas (Tukey p≤0.05) (Cuadro 9).

Analizando los contenidos de HTP según la ubicación de los puntos en el plano (Figura 10), se observa que los puntos 1, 2 y 3 ubicados sobre la superficie entre los ductos y la presa de quema – pozo taponado, presentan una tendencia de disminución en los contenidos de HTP el DM de la época de sequía. Los P1 y P2 del DM para la época de nortes reflejó que los contenidos son mayores en 1.04 y 1.19 veces respecto a los localizados el DM de la época de lluvias, sin embargo, los contenidos bajan 3.8 y 5.77 veces para el DM en época de sequía.

El P3 presenta la tendencia a bajar 11.4 veces los contenidos de HTP el DM en la época de sequía respecto al DM de la época de nortes y 13.81 respecto al DM en época de lluvias. La dinámica de los HTP en el área en donde se ubican los tres puntos anteriores posiblemente se debe a que recibe el petróleo de manera cíclica en el año derivado de la ruptura de ductos y de la presa de quema.

Los puntos 4, 5 y 6 localizados en la parte norte de la presa de quema y pozo taponado (Figura 10), presentan al igual que los puntos 1, 2 y 3 una dinámica oscilatoria en los contenidos de HTP (Cuadro 9), es evidente que los contenidos bajan para el DM en la época de lluvias, en comparación con el DM de la época de sequía, el P4 baja 7.52 veces, el P5 disminuye 5.34 y el P6 bajó 9.68.

Esta información comprueba que el área recibe petróleo por influencia del movimiento del agua depositada por lluvias y desbordamiento de río Tonalá, lo cual induce que la lámina de agua en el sitio se incremente hasta dos metros sobre la superficie. Sin embargo, en estudios realizados por Rodríguez *et al.* (1997) dentro del área lagunar del Carmen-Machona y Mecoacan localizados en la línea costera oeste del Estado de Tabasco, encontraron que durante el período de mayor precipitación los niveles de hidrocarburos aromáticos polinucleares totales se cuadruplicaron, lo cual se relacionó con el arrastre proveniente de las lluvias desde sus sitios de origen.

El punto 7 se ubica al noreste de la presa de quema y al este del camino, así como los puntos 8 y 9 localizados al este de la presa de quema y al oeste de la casa habitacional de la familia (Figura 10), tan solo el P7 y el P9 presentan una tendencia a aumentar los contenidos de HTP el DM de la época de nortes, en comparación con el DM de la época de lluvias y a disminuir del DM en la época de seca, respecto al DM en la época de nortes, estas disminuciones son; P7 con 1.89 y P9 con 5.39, mientras que el P8 disminuye 2 veces del DM en la época de nortes, respecto al DM de la época de lluvias y 9.97 veces del DM en la época de seca, en comparación con el DM de la época de seca. Al parecer el movimiento de los hidrocarburos en el sitio presenta el mismo comportamiento de los seis puntos antes mencionados (Cuadro 9).

Para el DM de las tres época del año, los contenidos de HTP en los nueve puntos evaluados fueron superiores a 1,200 y 3,000 mg kg⁻¹ de fracción mediana y pesada permisibles para suelos agrícolas que indica la NOM-138-SEMARNAT/SS-2003 (DOF, 2005). Lo que indica la necesidad de restaurar el suelo, debido al potencial tóxico y cancerígeno de los hidrocarburos para los seres vivos que habitan el ecosistema y sobre todo la exposición del dueño del terreno y su familia que siguen manipulando a los componentes del sistema en cada ciclo agrícola-pecuario.

Estadísticamente (Tukey, $p \leq 0.05$), el DM de la época de lluvias (septiembre 2009) evidenció altos contenidos de HTP que se localizaron en el P8 con $147,940 \text{ mg kg}^{-1}$ s.s. y el menor contenido con $60,916 \text{ mg kg}^{-1}$ s.s. se encontró en el P4 (Cuadro 9) (A1, Cuadro 5), esto posiblemente proviene del depósito de petróleo que contiene la presa, la cual se desborda cada año en la época de nortes, sin embargo estos hidrocarburos se siguen moviendo, fitooxidando y/o removiendo por proceso químicos y biológicos.

En cambio, para el DM de la época de nortes (enero 2010) (A2, Cuadro 26) y secas (abril 2010) (A3, Cuadro 47), el P7 reflejó los mayores contenidos de HTP, con $212,174$ y $112,299 \text{ mg kg}^{-1}$ s.s., respectivamente. Sin embargo, los menores contenidos con $42,104$ y $6,667 \text{ mg kg}^{-1}$ s.s., se localizaron en los P6 y P3 para ambos DM referentes a cada época del año. Este ciclo de movimiento de los hidrocarburos en este punto es un indicador del nivel de recepción y depósito de petróleo, el cual dado su baja densidad el agua lo movilizada de un lugar a otro. Asimismo, estudios realizados en diferentes años, en este mismo sitio, reportan contenidos de hidrocarburos totales del petróleo de hasta $322,841 \text{ mg kg}^{-1}$ s.s. (Rivera-Cruz *et al.*, 2002a); $79,457 \text{ mg kg}^{-1}$ s.s. (Rivera-Cruz y Trujillo-Narcía, 2004) y $542,929 \text{ mg kg}^{-1}$ s.s. (Trujillo-Narcía y Rivera-Cruz, 2005).

Cuadro 9. Concentración de hidrocarburos totales del petróleo por punto de muestreo para un día específico de tres épocas del año.

Punto de muestreo	Época del año		
	Lluvias [†]	Nortes [†]	Seca [†]
1	119373b [†]	124134b	32660b
2	76086cde	90313cd	15644cd
3	92086c	76140d	6667f
4	60916e	62889de	8100ef
5	75796cde	65382de	14184de
6	71469de	42104e	7381f
7	86292cd	212174a	112299a
8	147940a	74048d	7423f
9	86472cd	116754bc	21641c

[†] Medias con diferente letra dentro de cada columna muestran diferencias estadísticas (Tukey, $p < 0.05$)

[†] Hace referencia al 30 de septiembre de 2009 (lluvias), 30 de enero del 2010 (nortes) y 30 de abril del 2010 (seca).

6.2.7. Las plantas del suelo

6.2.7.1. Época de lluvias (30 de septiembre de 2009)

En el DM de la época de lluvias se localizaron en total 12 especies vegetales distribuidas en los nueve puntos de muestreo (Cuadro 10). En el P1 y P8 se localizó una mayor diversidad (4 especies vegetales), en el P1 predominaron tres *Poaceae* (pasto arrocillo, pasto egipto y pasto japonesa) y una *Juncaceae* spp. (tule), de las tres *Poaceae* dos de ellas plantados por el dueño del terreno y en el P8 tres especies silvestres (camalote, cebollín y flor morada) y una *Poaceae* (pasto japonesa).

El P6 y P9 presentaron cada uno de ellos, una diversidad de tres especies vegetales. Entre estas especies el pasto alemán, flor morada y tulillo en el P6, pero en el P9 se encontraron la flor morada, pasto salisaca y hoja ancha. En los P4, P5 y P7 con dos especies vegetales, el P4 con pasto arrocillo y tulillo, el P5 con pasto alemán y tulillo y el P7 con tulillo y zacatillo. La menor diversidad con una especie vegetal se localizó en los puntos P2 y P3 y esta especie fue el pasto japonesa (*Poaceae* spp).

La mayor cobertura vegetal con 1 % se localizó en los puntos P2, P3 y P7 debido a que la diversidad vegetal que predominó fue una especie (pasto japonesa), aunque en el P7 fue la especie (zacatillo) que cubrió un 99 % el área. Los P1 y P8 presentaron una mayor distribución de la vegetación, cuantificando al pasto japonesa (*Poaceae* spp.) con una cobertura de 56 % y 82 %, respectivamente.

La mayor producción de biomasa vegetal con 805 g m⁻² se localizó en el P5 y la menor con 308 g m⁻² en el P9. En tanto que no se encontró efecto alguno derivado de los contenidos de HTP para esta época, por lo que se puede interpretar que tanto los pastos como las especies silvestres se han adaptado a estas concentraciones cambiantes en el suelo.

6.2.7.2. Época de nortes (30 de enero de 2010)

En lo referente al DM en la época de nortes se encontró un total de seis especies vegetales (Cuadro 10). Esto representa una reducción del 50 % en la diversidad de especies, respecto al DM de la época de lluvia. El P6 y P7 se caracterizó por presentar una diversidad de dos especies vegetales, de las cuales el pasto japonesa (*Poaceae* spp.) y el zacatillo (*Poaceae* spp.) cubrieron un 55 % y 97 %, respectivamente.

En los P1, P2, P4, P8 y P9, se encontró la menor diversidad (1 especie vegetal), en el P1 y P2 la especie vegetal encontrada fue el tule (*Cyperaceae* spp.), mientras que en el P4 se encontró la hoja de laguna (*Nymphaeaceae* spp.), pero en el P8 se encontró la especie zacatillo y en el P9 se encontró al pasto de hoja ancha, en todas las especies vegetales antes mencionadas presentaron coberturas del 100 %.

La mayor producción de biomasa aérea seca total fue de 236 g m⁻², cuantificado en el P4, mientras que los P3 y P5 no presentaron ninguna especie vegetal (Cuadro 10). En tanto, se encontró que estas reducciones en los porcentajes de cobertura y producción de biomasa no están íntimamente relacionadas con la concentración de HTP en el suelo, más bien se debió al efecto provocado por las altas precipitaciones registradas durante el mes de noviembre (Figura 13). Al respecto, Rivera-Cruz *et al.* (2005) encontraron en el mismo sitio que la especie dominante es el pasto alemán (*Echinochloa polystachya*) con un 95 % de cobertura, así como las especies tulillo (*Cyperus articulatus*), espadaño (*Typha* sp.) y cebollín (*Cyperus* sp.) con 20, 30 y 40 % de cobertura, respectivamente.

6.2.7.3. Época de seca (30 de abril de 2010)

El DM en la época de seca se caracterizó por presentar dos especies vegetales más que las encontradas el DM de la época de nortes, así como el de aumentar la diversidad y la producción de biomasa aérea seca total (Cuadro 10). El P4 y P5 presentaron una mayor diversidad (3 especies vegetales), la especie vegetal que más predominó fue el pasto japonesa (*Poaceae* spp.) y el tulillo (*Cyperaceae* spp), con 77 % y 51 %, respectivamente. Los P1, P2, P3, P6 y P9 mostraron una diversidad de dos especies vegetales, las coberturas más dominantes se encontraron en el cebollín para el P1 y en el pasto japonesa para el P2 y P3, mientras que el pasto alfombra con 60 % y 83 % presentó la mejor cobertura para el P6 y P9, respectivamente.

El P7 y P8 evidenciaron una diversidad de una especie vegetal, dichas especies mostraron una cobertura al 100 % para el zacatillo (*Poaceae* spp.) y flor morada (*Astereaceae* spp.), respectivamente. En cambio, la mejor producción de biomasa aérea seca se encontró en el P9 con 600 g m⁻². Al igual el DM en la época de lluvias y nortes, el DM de la época de seca tampoco se encontró una relación de los HTP con la producción de biomasa aérea seca, sino que se observó que el sitio apenas comenzaba con su ciclo de recuperación tras permanecer en estado de anegamiento.

Los altos porcentajes en la cobertura vegetal encontrados para el DM de la época de seca pueden estar relacionados con la altura que alcanza la planta y la cantidad de hojas que produce, inhibiendo el crecimiento de otras especies que se encuentran por debajo de estas. Estudios realizados en invernadero, han mostrado que la altura de la planta se afecta a medida que se incrementan los niveles de contaminación en el suelo (Ogbo *et al.*, 2009). Asimismo en concentraciones de 50,000 mg kg⁻¹ de HTP la producción de biomasa aérea se inhibe en comparación a la planta que crece en suelo sin petróleo (Dorantes, 2008).

Cuadro 10. Biomasa aérea seca total, cobertura y diversidad de especies en puntos de muestreo contaminados con hidrocarburos del petróleo.

Época del año/Especie vegetal	Punto de muestreo								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<u>Lluvias (30 de septiembre de 2009)</u>									
Pasto alemán (<i>Poaceae</i> spp.)					91	81			
Pasto arrozillo (<i>Poaceae</i> spp.)	1 [†]			51					
Camalote (<i>Poaceae</i> spp.)								16	
Cebollín (<i>Cyperaceae</i> spp.)								1	
Pasto egipcio (<i>Poaceae</i> spp.)	19								
Flor morada (<i>Astereaceae</i> spp.)						1		1	5
Pasto japonesa (<i>Poaceae</i> spp.)	56	100	100					82	
Pasto salisaca (<i>Poaceae</i> spp.)									72
Tule (<i>Juncaceae</i> spp.)	24								
Tuilillo (<i>Cyperaceae</i> spp.)				49	9	18	1		
Pasto de hoja ancha (<i>Poaceae</i> spp.)									23
Zacatillo (<i>Poaceae</i> spp.)								99	
Diversidad (Número de especies)	4	1	1	2	2	3	2	4	3
Índice de Simpson (% cobertura)	0.41	1	1	0.5	0.84	0.68	1	0.71	0.57
Biomasa aérea seca (g m ⁻²)	381	581	476	466	805	500	385	319	308
HTP (mg kg ⁻¹)	119,373	76,086	92,086	60,916	75,796	71,469	86,292	147,940	86,472
<u>Nortes (30 de enero de 2010)</u>									
Pasto japonesa (<i>Poaceae</i> spp.)						55			
Hoja de laguna (<i>Nymphaeaceae</i> spp.)				100					
Tule (<i>Juncaceae</i> spp.)	100 [†]	100					3		
Tuilillo (<i>Cyperaceae</i> spp.)						45			
Pasto de hoja ancha (<i>Poaceae</i> spp.)									100
Zacatillo (<i>Poaceae</i> spp.)							97	100	
Diversidad (Número de especies)	1	1	0	1	0	2	2	1	1
Índice de Simpson (% cobertura)	1	1	0	1	0	0.51	0.93	1	1
Biomasa aérea seca (g m ⁻²)	56	32	0	236	0	7	135	40	61
HTP (mg kg ⁻¹)	124,134	90,313	76,140	62,889	65,382	42,104	212,174	74,048	116,754
<u>Seca (30 de abril de 2010)</u>									
Pasto alfombra (<i>Poaceae</i> spp.)						60			83
Camalote (<i>Poaceae</i> spp.)									17
Cebollín (<i>Cyperaceae</i> spp.)	80 [†]				38				
Flor morada (<i>Astereaceae</i> spp.)						40		100	
Pasto japonesa (<i>Poaceae</i> spp.)		64	84	77					
Tule (<i>Juncaceae</i> spp.)	20	36	16						
Tuilillo (<i>Cyperaceae</i> spp.)				1	51				
Zacatillo (<i>Poaceae</i> spp.)				22	11		100		
Diversidad (Número de especies)	2	2	2	3	3	2	1	1	2
Índice de Simpson (% cobertura)	0.68	0.54	0.73	0.64	0.42	0.52	1	1	0.71
Biomasa aérea seca (g m ⁻²)	372	176	107	65	74	387	445	170	600
HTP (mg kg ⁻¹)	32,660	15,644	6,667	8,100	14,184	7,381	112,299	7,423	21,641

[†] Porcentaje de cobertura de cada especie vegetal por unidad experimental dentro de cada época del año.

6.2.8. La macrofauna del suelo

La macrofauna del suelo para un día específico de cada época del año dentro de los puntos de muestreo resultó ser muy variable en cuanto a los grupos taxonómicos encontrados. En el P3, P6 y P9 del DM de la época de lluvias predominó la clase *Gastropoda*, particularmente por el orden *Basommatophora* con un individuo por m⁻² (Cuadro 11), y se observa una ausencia de los grupos taxonómicos en los seis puntos restantes.

Sin embargo, un estudio realizado en el municipio de Minatitlán, Veracruz, en un sitio contaminado con hidrocarburos se encontró en la zona testigo una abundancia de 569 individuos, mientras que la zona contaminada ($214,515 \text{ mg kg}^{-1}$ s.s. de HTP) presentó solo 39 individuos (Uribe-Hernández *et al.*, 2010).

El DM dentro de la época de nortes se caracterizó por la presencia de especies de la clase *Insecta* y *Gastropoda*, mayormente por el orden *Basommatophora* en el suelo del P3 con una abundancia de 19 individuos m^{-2} , seguida del P8 con 15 individuos m^{-2} , de donde 13 de ellos pertenecen a la clase *Insecta* y los dos restantes a la clase *Gastropoda* (Cuadro 11).

En cambio, el DM en la época de seca presentó un aumento considerable en la abundancia, así en el suelo del P3 se encontraron 37 individuos m^{-2} , integrados fundamentalmente por la clase *Gastropoda* con 30 individuos m^{-2} , *Insecta* con 5 individuos m^{-2} y *Huridinea* con 2 individuos m^{-2} . Este mayor número de especies puede estar relacionado con los bajos contenidos de HTP ($6,667 \text{ mg kg}^{-1}$ s.s.) y las condiciones aeróbicas en el suelo durante el DM de la época de seca (Cuadro 11). La importancia en el suelo de los dípteros que pertenecen a la clase *Insecta* es porque representan un 42.5 % de los organismos y son importantes en la transformación de nutrientes (Carneiro *et al.*, 2008).

Los números de taxa reflejaron un total de uno para el DM en la época de lluvias, cuatro el DM de la época de nortes y ocho para el DM en la época de seca, mostrando que este último muestreo es el más apto para la sobrevivencia y adaptación de los diferentes grupos taxonómicos a estos suelos que han sido impactados por la actividad antropogénica. Los taxa encontrados en este estudio para el DM en época de seca son similares a los encontrados por Uribe-Hernández *et al.* (2010) con siete taxones en la zona contaminada con hidrocarburos.

Cuadro 11. Total de individuos por grupo de macrofauna correspondientes a cada punto de muestreo para un día específico por época del año.

Grupo taxonómico	Época del año																				
	Lluvias [†]			Nortes [‡]									Seca [‡]								
	3	6	9	Punto de muestreo									1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>Arachnida</i>																					
<i>Araneida</i>													1	1					6		
<i>Insecta</i>																					
<i>Coleóptera</i>									1	1	13	4		3	2	1	3	1	2	1	2
<i>Díptera</i>				2		9	1							3	1				1		1
<i>Hemíptera</i>														2					1		
<i>Lepidóptera</i>																			4		1
<i>Neuróptera</i>							1					1									
<i>Trichoptera</i>															2	1					4
<i>Gastropoda</i>																					
<i>Basommatophora</i>	1 [†]	1	1		19		2				2		9	6	30		2		3		1
<i>Hirudinea</i>																					
<i>Arhynchobdellida</i>															2		1				
Abundancia (individuos m ⁻²)	1	1	1	2	19	9	4	1	1	15	5	10	15	37	2	6	1	11	11	5	5
Número de taxa	1	1	1	1	1	1	3	1	1	2	2	2	5	5	2	3	1	5	3	4	4

[†] Número de individuos por grupo taxonómico de cada punto de muestreo para un día específico de cada época del año.

[‡] Hace referencia al 30 de septiembre de 2009 (Lluvias), 30 de enero del 2010 (nortes) y 30 de abril del 2010 (seca).

6.2.9. La microflora del suelo a distancia y suelo rizosférico de plantas

Las medias de las poblaciones de bacterias fijadoras de N atmosférico de vida libre (BFN), bacterias solubilizadoras de P (BSP), bacterias solubilizadoras de K (BSK) y los hongos heterótrofos (HH) mostraron diferencias estadísticas significativas (Tukey $p \leq 0.05$) (Cuadro 12; Figura 16a, 16b y 16c), por punto de muestreo para un día específico de la época de lluvias, nortes y seca, tanto en suelo a distancia como en suelo rizosférico.

6.2.9.1. Poblaciones de bacterias en época de lluvias (30 de septiembre de 2009)

Las medias de las poblaciones de BFN, BSP y BSK el DM en la época de lluvia por punto de muestreo en suelo a distancia y suelo rizosférico mostró diferencias estadísticas significativas (Tukey, $p \leq 0.05$) (Cuadro 12). Estadísticamente (Tukey, $p \leq 0.05$) la población de BFN ascendió a 9 y 8 x 10⁵ UFC g⁻¹ s.s., en suelo a distancia y suelo rizosférico (Cuadro 12) (A1, Cuadro 10), evidenciando una mayor formación de este grupo de bacterias en el suelo a distancia del P4 (A1, Cuadro 6), este suelo contiene la menor cantidad de HTP (60,916 mg kg⁻¹ s.s.), respecto a los ocho puntos restantes.

Investigaciones realizadas en la rizósfera de *Chamaecrista nictitans* han demostrado altas poblaciones de BFN (208×10^5 UFC g^{-1} s.r.), en contenidos de $4,600 \text{ mg kg}^{-1}$ de HTP (Hernández-Acosta *et al.*, 2006). Asimismo, Morales (2007) encontró que la presencia de raíces influye en el crecimiento de las poblaciones de BFN, presentando mayores poblaciones en la rizósfera de arroz línea 21 en concentración de $30,000 \text{ mg kg}^{-1}$ de petróleo nuevo e intemperizado. Mientras que Vázquez (2006) afirma que las BFN disminuyen conforme se aumenta el contenido de petróleo nuevo.

Las BSP estadísticamente (Tukey, $p \leq 0.05$), mostraron altas poblaciones en suelo a distancia (97×10^5 UFC g^{-1} s.s.) (A1, Cuadro 7) y suelo rizosférico (99×10^5 UFC g^{-1} s.r.) (A1, Cuadro 11), localizados en los P1 y P5. Por otra parte, las BSK mostraron poblaciones mayores en el P2 del suelo a distancia con 391×10^5 UFC g^{-1} s.s. (A1, Cuadro 8), mientras que en el suelo rizosférico, las BSK fueron estimuladas por altos contenidos de HTP ($86,472 \text{ mg kg}^{-1}$ s.s.), encontrándose una población de 136×10^5 UFC g^{-1} s.r., en el P9 (Cuadro 12) (A1, Cuadro 12), atribuyendo a este grupo bacteriano altas UFC respecto a las BFN y BSP en los diferentes puntos de muestreo.

6.2.9.2. Poblaciones de hongos heterótrofos en época de lluvias (30 de septiembre de 2009)

Las medias de los hongos heterótrofos por punto de muestreo en suelo a distancia y suelo rizosférico para el DM en la época de lluvia mostró diferencias estadísticas significativas (Tukey, $p \leq 0.05$) (Figura 16a). El suelo a distancia evidenció la mejor proliferación de hongos en el P9 con una población de 91×10^2 UFC g^{-1} s.s. (A1, Cuadro 9), mientras que en el suelo rizosférico en el P7 se encontró una mejor formación de hongos con una población de 108×10^2 UFC g^{-1} s.r. (A1, Cuadro 13).

Este aumento en las UFC de hongos heterótrofos puede estar relacionado con los bajos porcentajes de humedad gravimétrica que se encontraron en los P7 (27 %), P8 (32 %) y P9 (32 %), mientras que los contenidos de humedad gravimétrica en los demás puntos muestran una tendencia de inhibición en las poblaciones de hongos heterótrofos. Aunque, estudios recientes han demostrado que la presencia del manto freático reduce la multiplicación de los hongos, posiblemente por el exceso de humedad que existe en el suelo (Rivera-Cruz *et al.*, 2002a), así como la concentración de petróleo en el suelo, debido a que incrementa las poblaciones de hongos heterótrofos (Trujillo-Narcía *et al.*, 2006).

Cuadro 12. Poblaciones de bacterias en suelo a distancia y suelo rizosférico por punto de muestreo para un día específico en cada época del año.

Puntos		Época del año								
		Lluvias [§]			Nortes [§]			Seca [§]		
		BFN [¶]	BSP [¶]	BSK [¶]	BFN	BSP	BSK	BFN	BSP	BSK
		UFC (x 10 ⁶) g ⁻¹ s.s.			UFC (x 10 ²) g ⁻¹ s.s.			UFC (x 10 ⁴) g ⁻¹ s.s.		
Suelo a distancia	1	2c [†]	97a	29e	2c	0c	2d	15c	33cde	24ab
	2	2cd	13c	391a	4c	0c	7d	8de	48c	10cde
	3	1de	5de	34de	--	--	--	12cd	14e	7de
	4	9a	82b	19e	180a	0c	200a	1	9e	21abc
	5	1cd	9d	93cd	--	--	--	4ef	89b	18abcd
	6	1e	9d	57de	16c	11a	93c	44a	185a	26a
	7	1cd	3e	17e	79b	4bc	99c	27b	24de	2e
	8	1de	8d	147bc	1c	5b	20d	3f	40cd	3e
	9	3b	8d	188b	5c	5b	200b	14c	96b	14bcd
Suelo rizosférico	1	3cd	75b	72b	20c	11,100b	500c	73b	5b	75bc
	2	0e	8fg	8d	300b	32,700a	1,300c	22c	1c	247a
	3	8a	10f	79b	--	--	--	148a	6a	121b
	4	5b	13e	55c	40c	40b	1,200c	13c	1c	27bc
	5	5b	99a	50c	--	--	--	23c	1c	49bc
	6	6b	41c	80b	60bc	2,600b	1,000c	29c	1c	102bc
	7	2d	5g	79b	1,500a	0b	5,000bc	27c	1c	6c
	8	4bc	6g	56c	200bc	400b	7,400b	25c	1c	282a
	9	3cd	18d	136a	100bc	13b	19,200a	152a	1c	256a

[†] Medias con diferente letra dentro de la columna muestran diferencias estadísticas significativas (Tukey, p<0.05).

[¶] BFN=Bacterias fijadoras de nitrógeno, BSP=Bacterias solubilizadoras de fosfatos y BSK=Bacterias solubilizadoras de potasio.

-- No se cuantificó.

[§] Hace referencia al 30 de septiembre de 2009 (lluvias), 30 de enero del 2010 (nortes) y 30 de abril del 2010 (seca).

6.2.9.3. Poblaciones de bacterias en época de nortes (30 de enero de 2010)

Las medias de las poblaciones de BFN, BSP y BSK para el DM de la época de nortes por punto en suelo a distancia y suelo rizosférico mostró diferencias estadísticas significativas (Tukey, p≤0.05) (Cuadro 12).

El DM de la época de nortes se presentó una ausencia de especies vegetales en los P3 y P5, lo cual limitó la evaluación de las UFC en suelo a distancia y suelo rizosférico, esto se debió al efecto que provocó el aumento del nivel superficial del agua sobre el suelo hasta una altura de 200 cm, es decir, 120 cm más que el encontrado el DM en la época de lluvia.

Las mayores UFC de BFN, en suelo a distancia se localizaron en el P4 con una población de 18×10^3 UFC g^{-1} s.s. (A2, Cuadro 27), mientras que en suelo rizosférico, los altos contenidos de HTP ($212,174 \text{ mg kg}^{-1}$) estimularon una población de 15×10^4 UFC g^{-1} s.r., dentro del P7 (A2, Cuadro 31). Las BSP en el P6 con la menor concentración de HTP ($42,104 \text{ mg kg}^{-1}$ s.s.) en suelo a distancia evidenció una población de 11×10^2 UFC g^{-1} s.s. (A2, Cuadro 28), aumentando considerablemente a 327×10^4 UFC g^{-1} s.r., en el suelo rizosférico dentro del P2 (A2, Cuadro 32). Asimismo, las BSK en suelo a distancia fueron mejor en el P4 reflejando una población de 20×10^3 UFC g^{-1} s.s. (A2, Cuadro 29), y siendo más evidentes en el suelo rizosférico con una población de 192×10^4 UFC g^{-1} s.r., en el P9 (Cuadro 12) (A2, Cuadro 33).

6.2.9.4. Poblaciones de hongos heterótrofos en época de nortes (30 de enero de 2010)

Las medias de los hongos heterótrofos para el DM en la época de nortes por punto en suelo a distancia y suelo rizosférico mostró diferencias estadísticas significativas (Tukey, $p \leq 0.05$) (Figura 16b). Para este DM en la época de nortes se puede apreciar la ausencia de los hongos heterótrofos dentro del P3 y P5, se debió a que no se encontró ninguna especie vegetal. El P8 resultó ser la más representativa, tanto en suelo a distancia (75×10^2 UFC g^{-1} s.s.) (A2, Cuadro 30), como en suelo rizosférico (102×10^2 UFC g^{-1} s.r.) (A2, Cuadro 34).

La ubicación del P8 en el plano (Figura 10), se encuentran al este de la presa de quema y al oeste de la casa habitacional de la familia, entre estos puntos y los restantes se localiza un camino vecinal de 1 m de altura construido para que los vehículos tengan acceso hasta la caseta de protección catódica, sin embargo, los P8 y P9 se encuentran en la parte más alta de toda el área de estudio (44,321.199 m²), lo cual podría estar relacionado con los bajos contenidos de humedad gravimétrica y por consecuencia con la mayor formación de HH, así como la función que ejerce el camino como una barrera de contención para que el agua fluya con menor velocidad.

6.2.9.5. Poblaciones de bacterias en época de seca (30 de abril de 2010)

Las medias de las poblaciones de BFN, BSP y BSK para el DM en la época de seca por punto de muestreo en suelo a distancia y suelo rizosférico mostraron diferencias estadísticas significativas (Tukey, $p \leq 0.05$) (Cuadro 12). Se encontró que la cantidad BFN mostraron una ligera recuperación en las UFC después del proceso de inundación en el sitio de estudio (200 cm arriba de la superficie del suelo), que se presentó durante los meses correspondientes a la época de nortes. Estadísticamente (Tukey, $p \leq 0.05$), el P6 reflejó la mayor población con 44×10^4 UFC g⁻¹ en suelo a distancia (A3, Cuadro 48), mientras que el suelo rizosférico promovió más su crecimiento en el P9 con una población de 152×10^4 UFC g⁻¹ s.r. (A3, Cuadro 52), todo esto en BFN.

Las BSP en el suelo a distancia para el P6 evidenció una población de 185×10^4 UFC g⁻¹ s.s. (A3, Cuadro 49), pero en el P3 se encontró el menor contenido de HTP (6,667 mg kg⁻¹ s.s.) y en consecuencia una población de 6×10^4 UFC g⁻¹ en el suelo rizosférico (A3, Cuadro 53). Por otra parte, en cuanto a las BSK en el suelo a distancia, el P6 mostró la mayor población con 26×10^4 UFC g⁻¹ s.s. (A3, Cuadro 50), mientras que el suelo rizosférico se promovió una población de 282×10^4 UFC g⁻¹ s.r. en el P8 (Cuadro 11) (A3, Cuadro 54).

6.2.9.6. Poblaciones de hongos heterótrofos en época de seca (30 de abril de 2010)

Las medias de las poblaciones de hongos heterótrofos el DM para la época de seca en suelo a distancia y suelo rizosférico por punto de muestreo mostró diferencias estadísticas significativas (Tukey, $p \leq 0.05$) (Figura 16c). La mayor población de hongos heterótrofos en suelo a distancia se encontró en el P6 (22×10^3 UFC g^{-1} s.s.) (A3, Cuadro 51), mientras que en suelo rizosférico se presentó en el P9 (75×10^3 UFC g^{-1} s.r.) (A3, Cuadro 55). En cambio, la menor formación de hongos heterótrofos se encontró en el P3 con 20×10^2 UFC g^{-1} s.s. y 20×10^1 UFC g^{-1} s.r. para el suelo a distancia y suelo rizosférico, respectivamente.

6.2.9.7. Efecto rizósfera de bacterias y hongos para un día específico en cada época del año

El efecto rizósfera que es la relación de la población microbiana en el suelo rizosférico entre la obtenida en el suelo a distancia. El mayor o menor efecto rizósfera obtenido con las poblaciones de bacterias fijadoras de N atmosférica de vida, con bacterias solubilizadoras de fosfato, bacterias solubilizadoras de potasio y hongos heterótrofos presentaron diferencias estadísticas significativas entre los puntos muestreados (Tukey $p \leq 0.05$) (Cuadro 13) por efecto del DM para cada época del año.

Los mayores efectos rizósfera para el DM dentro de la temporada de lluvia se encontraron en el P6 (6.56), P6 (16.14), P8 (167.34) y P1 (11.43) para las BFN, BSP, BSK y HH, respectivamente. Mientras que el DM de la época de nortes, se localizó en las BFN un efecto rizósfera de 517.82 y en las BSK un efecto de 3,060.43, ambas en el P7, pero las BSP y HH reflejaron un efecto en el P2 de 75,748.30 y 3.80, respectivamente. Asimismo, el DM de la temporada de seca en el P3 se encontró un mejor efecto rizósfera en las BFN de 97.23 y para las BSP de 0.51, mientras que en el P2 las BSK evidenciaron un efecto de 140.89 y los HH de 4.14 (Cuadro 13).

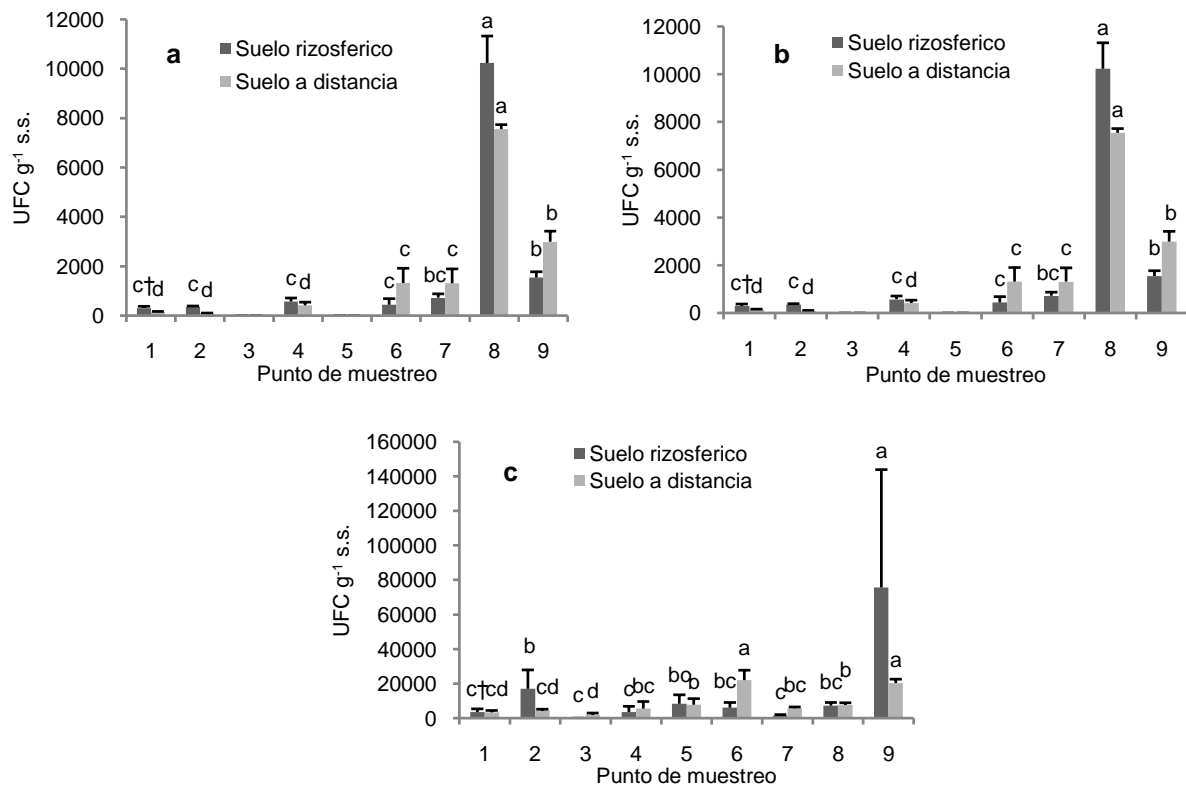


Figura 16. Poblaciones de hongos heterótrofos en suelo a distancia y suelo rizosférico en cada punto por época del año; a) lluvia, b) nortes y c) seca.

Cuadro 13. Efecto rizósfera de bacterias y hongos por punto de muestreo para un día específico de tres épocas del año.

Época del año		Punto de muestreo								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Lluvia [§]	BFN [†]	1.62d [†]	1.43d	3.65c	1.45c	4.70bc	6.56a	1.86d	5.40ab	1.37d
	BSP [†]	3.15bc	0.81c	3.58bc	1.39c	16.14a	6.38b	1.34c	1.77c	3.27bc
	BSK [†]	35.93b	0.24c	0.83c	3.04bc	8.19bc	1.49bc	2.73bc	167.34a	4.21bc
	HH [†]	11.43a	3.84c	9.99a	1.38cd	1.04d	1.30d	6.94b	0.34d	0.25d
Nortes [§]	BFN	8.28b	60.02b	--	0.23b	--	3.70b	517.82a	183.17b	21.78b
	BSP	34950.83ab	75748.30a	--	75.15b	--	578.16b	0.06b	74.15b	2.67b
	BSK	212.43b	185.36b	--	5.32b	--	14.40b	3060.43a	370.92b	91.62b
	HH	2.18b	3.80a	--	1.43c	--	0.47d	0.66d	1.35c	0.52d
Seca [§]	BFN	5.01b	7.68b	97.23a	15.94b	8.70b	0.81b	1.00b	8.98b	80.18a
	BSP	0.31ab	0.03c	0.51a	0.09bc	0.04c	0.00c	0.03c	0.02c	0.01c
	BSK	3.61c	140.89a	78.66b	1.33c	8.16c	3.92c	2.56c	104.31ab	13.38c
	HH	1.36bc	4.14a	0.01c	1.28bc	1.72b	0.32bc	0.27bc	1.03bc	4.00a

[†] Medias con diferente letra dentro de cada fila muestran diferencias estadísticas (Tukey, p<0.05).

^{††} BFN=Bacterias fijadoras de nitrógeno, BSP=Bacterias solubilizadoras de fosfatos, BSK=Bacterias solubilizadoras de potasio y HH=Hongos heterótrofos.

-- No se cuantificó.

[§] Hace referencia al 30 de septiembre de 2009 (lluvias), 30 de enero del 2010 (nortes) y 30 de abril del 2010 (seca).

6.2.10. La microflora del suelo a distancia y suelo rizosférico por especie vegetal para un día específico para cada época del año.

Las poblaciones de los cuatro tipos de microflora (BFN, BSP, BSK y HH) en el suelo a distancia y suelo rizosférico de 12, 6 y 8 especies vegetales mostraron diferencias estadísticas significativas (Tukey, $p \leq 0.05$) (Cuadro 14, Cuadro 15, Cuadro 16 y Cuadro 17) para el DM de cada época del año evaluada según la especie vegetal.

6.2.10.1. Poblaciones de bacterias y hongos heterótrofos en suelo a distancia y suelo rizosférico por especie vegetal en época de lluvia (30 de septiembre de 2009)

En el Cuadro 14 se observa que durante el muestreo realizado el 30 de septiembre de 2009, dentro de la época de lluvias se evaluaron en 12 especies vegetales las poblaciones de BFN, BSP, BSK y HH en suelo a distancia y suelo rizosférico (Cuadro 14). La especie vegetal indujo diferencias estadísticas significativas (Tukey, $p \leq 0.05$) en bacterias y hongos heterótrofos (Cuadro 14 y 17).

El DM referente a la época de lluvias, evidenció que la especie vegetal pasto arrocillo (*Poaceae* spp.), estadísticamente (Tukey, $p \leq 0.05$) fue la que más promovió el crecimiento de BFN en suelo a distancia, representada con una población de 82×10^4 UFC g^{-1} s.s. (A1, Cuadro 14), mientras que en el suelo rizosférico la especie vegetal camalote (*Poaceae* spp.) y tulillo evidenciaron una población de 58×10^4 y 56×10^4 UFC g^{-1} s.r. (A1, Cuadro 18), respectivamente, y el mayor efecto rizósfera con 11.44 fue localizado al relacionar las poblaciones del suelo rizosférico con el suelo a distancia en la especie vegetal camalote (Cuadro 14). En cambio, López (2010) en un suelo restaurado de Cunduacán, Tabasco encontró una población de 52×10^3 UFC g^{-1} s.r., la cual se limita por la profundidad a la que se encuentra la rizósfera de la planta.

La mayor población de BSP con 162×10^5 UFC g^{-1} en suelo a distancia se encontró en la especie vegetal tule (*Juncaceae* spp.) (A1, Cuadro 15), pero la rizósfera de pasto egipto (*Poaceae* spp.) promovió una mayor población con 129×10^5 UFC g^{-1} s.r. (A1, Cuadro 19). Se encontró que la especie vegetal denominada tulillo, en sus raíces induce un mayor efecto rizósfera con 10.64, respecto a las 11 especies localizadas en el área evaluada. Sin embargo, en suelos restaurados de Cunduacán, Tabasco se han encontrado poblaciones de 43×10^3 UFC g^{-1} s.s. (López, 2010), mientras que Orozco (2009) en el mismo sitio encontró en el pasto cabezón (*Cyperus* sp.) y pasto estrella de África (*Cynodon plectostachyus*) poblaciones de 71×10^4 y 64×10^4 UFC g^{-1} de suelo rizosférico, respectivamente.

La población de BSK estadísticamente fue mayor con 213×10^5 UFC g^{-1} s.s., en suelo a distancia de la especie vegetal cebollín (*Cyperaceae* spp.) (A1, Cuadro 16), y en suelo rizosférico del pasto salisaca (*Poaceae* spp.) con una población de 168×10^5 UFC g^{-1} s.r. (Cuadro 14) (A1, Cuadro 20), asimismo el efecto rizósfera fue observado en las 12 especies vegetales localizadas para el DM en la época de lluvia, pero el mayor efecto con 168.73 se localizó al relacionar rizósfera/suelo a distancia del pasto japonesa (*Poaceae* spp.)

Cuadro 14. Efecto rizósfera y poblaciones de BFN, BSP y BSK en suelo a distancia y suelo rizosférico por especie vegetal para un día específico de la época de lluvia.

Especie vegetal	BFN [†]			BSP [†]			BSK [†]		
	Suelo	Rizósfera	Efecto	Suelo	Rizósfera	Efecto	Suelo	Rizósfera	Efecto
	UFC ($\times 10^4$)	g^{-1} s.s.	rizósfera	UFC ($\times 10^5$)	g^{-1} s.s.	rizósfera	UFC ($\times 10^5$)	g^{-1} s.s.	rizósfera
Pasto alemán	13d [†]	50ab	5.28bc	9de	50c	4.47bc	10d	51g	8.55b
Pasto arrocillo	82a	34bc	0.92d	155b	8h	0.12c	46cd	17h	0.64b
Cebollín	14cd	35bc	2.43bcd	3fg	17i	0.90c	213a	8h	0.04b
Pasto egipto	21c	7d	0.34d	18c	129a	7.17ab	21d	129c	6.60b
Flor morada	14cd	25cd	2.21cd	9d	43d	4.50bc	196a	71ef	1.04b
Pasto japonesa	10de	40abc	5.06bc	8def	25f	4.25bc	110bc	74e	168.73a
Pasto salisaca	49b	30bc	0.61d	1g	16g	10.46a	158ab	168a	1.06b
Tule	16cd	41abc	2.53bcd	162a	99b	0.61c	0.5d	74e	131.31a
Tulillo	10de	56a	5.56b	2g	34e	10.64a	80bcd	59fg	1.95b
Pasto de hoja ancha	11de	27cd	2.50bcd	18c	13g	0.73c	196a	135bc	0.70b
Zacatillo	21c	22cd	1.10d	4efg	6h	1.81bc	23d	144b	6.17b
Camalote	5e	58a	11.44a	18c	1i	0.03c	38cd	90d	2.62b

[†] Medias con diferente letra dentro de cada columna muestran diferencias estadísticas significativas (Tukey, $p < 0.05$).

[†] BFN=Bacterias Fijadoras de Nitrógeno, BSP=Bacterias Solubilizadoras de Fosfatos, BSK=Bacterias Solubilizadoras de Potasio.

La población de hongos heterótrofos estadísticamente (Tukey, $p \leq 0.05$) fue mayor con 127×10^2 y 109×10^2 UFC g^{-1} en suelo a distancia del pasto salisaca (*Poaceae* spp.) y cebollín (*Cyperaceae* spp.) respectivamente (A1, Cuadro 17). En suelo rizosférico la mayor población de 67×10^2 UFC g^{-1} s.r. fue localizado en dos especies vegetales del mismo genero en Cebollín (*Cyperaceae* spp.) y en tulillo (*Cyperaceae* spp.) (A1, Cuadro 21). El mayor efecto rizósfera con 15.41 se asoció con el pasto egipto (*Poaceae* spp.) para el DM en la época de lluvias (Cuadro 17).

6.2.10.2. Poblaciones de bacterias y hongos heterótrofos en suelo a distancia y suelo rizosférico por especie vegetal en época de nortes (30 de enero de 2010)

Las poblaciones de BFN, BSP, BSK (Cuadro 15) y HH (Cuadro 17) en suelo a distancia y suelo rizosférico de pasto japonesa, tule, tulillo, pasto de hoja ancha, zacatillo y hoja de laguna, así como el efecto rizósfera de BFN, BSK y HH, mostraron diferencias estadísticas significativas (Tukey $p \leq 0.05$) (Cuadro 15 y 17) por efecto de especie vegetal.

La principal característica del DM en esta época es que presenta un 50 % menos número de especies vegetales, respecto al DM en la época de lluvias, aun así, la especie vegetal conocida comúnmente como hoja de laguna (*Nymphaceae* spp.) evidenció una mayor proliferación de BFN con una población de 17×10^3 UFC g^{-1} s.s. en el suelo a distancia (A2, Cuadro 35), pero en el suelo rizosférico la especie vegetal zacatillo (*Poaceae* spp.) fue mayor, con 148×10^3 UFC g^{-1} s.r. (A2, Cuadro 39). Esta misma especie vegetal indujo un mayor efecto rizósfera con 608.71.

Cuadro 15. Efecto rizósfera y poblaciones de BFN, BSP y BSK en suelo a distancia y suelo rizosférico por especie vegetal para un día específico de la época de nortes.

Especie vegetal	BFN [†]			BSP [†]			BSK [†]		
	Suelo UFC (x 10 ³) g ⁻¹ s.s.	Rizósfera g ⁻¹ s.s.	Efecto rizósfera	Suelo UFC (x 10 ⁴) g ⁻¹ s.s.	Rizósfera g ⁻¹ s.s.	Efecto rizósfera	Suelo UFC (x 10 ³) g ⁻¹ s.s.	Rizósfera g ⁻¹ s.s.	Efecto rizósfera
Pasto japonesa	1bc [†]	4b	3.30b	20a	1a	0.05a	10c	130c	8.50b
Tule	5b	17b	23.23b	2bc	14,600a	36899.72a	7d	80c	133.77b
Tulillo	1b	6b	4.09b	4b	5,200a	1156.27a	2e	40c	20.29b
Pasto de hoja ancha	0c	12b	21.78b	5b	13a	2.67a	20b	1,920a	91.62b
Zacatillo	0c	148a	608.71a	3bc	100a	37.11a	1f	840b	3244.13a
Hoja de laguna	17a	3b	0.23b	1c	40a	75.15a	30a	120c	5.32b

[†] Medias con diferente letra dentro de cada columna muestran diferencias estadísticas (Tukey, p<0.05).

[†] BFN=Bacterias Fijadoras de Nitrógeno, BSP=Bacterias Solubilizadoras de Fosfatos, BSK=Bacterias Solubilizadoras de Potasio.

La mayor población en suelo a distancia de BSP con 20×10^2 UFC fue localizada en pasto japonesa (A2, Cuadro 36), pero en el suelo rizosférico del tule (*Juncaceae* spp.) fue mayor la población con 146×10^4 UFC g⁻¹ s.r. (A2, Cuadro 40), y un efecto rizósfera de 36,899.72 mayor respecto al inducido por las cinco especies vegetales restantes (Cuadro 15). En estudios recientes, se han encontrado poblaciones de hasta 5.25×10^4 g⁻¹ s.r. de BSP en la rizósfera de *Matthiola incana* L., con limitaciones de los exudados radicales durante la fase inicial de adaptación y desarrollo de la bacteria, restringiendo el flujo de energía y dando origen a un descenso en el número de población de bacterias (Rawia *et al.*, 2009).

En suelo a distancia de la especie vegetal hoja de laguna (*Nymphaceae* spp.) evidenció una mayor población de BSK con 3×10^4 UFC g⁻¹ s.s. (A2, Cuadro 37), respecto a las cinco especies vegetales restantes. Mientras que en el suelo rizosférico el pasto de hoja ancha (*Poaceae* spp.) presentó una mayor población de 192×10^4 UFC g⁻¹ s.r. (A2, Cuadro 41). Sin embargo, la especie vegetal zacatillo (*Poaceae* spp.) presentó un efecto rizósfera de 3,244.13.

La población de hongos heterótrofos en suelo a distancia y rizósfera de zacatillo (*Poaceae* spp.) fueron mayores con 41×10^2 UFC g^{-1} s.s. (A2, Cuadro 38) y 54×10^2 UFC g^{-1} s.r. (A2, Cuadro 42), respectivamente. Mientras que el mayor efecto rizósfera (2.12) se localizó en la especie denominada tule (*Juncaceae* spp.) (Cuadro 17).

6.2.10.3. Poblaciones de bacterias y hongos heterótrofos en suelo a distancia y suelo rizosférico por especie vegetal en época de seca (30 de abril de 2010)

La media de las poblaciones de BFN, BSP, BSK (Cuadro 16) y HH (Cuadro 17) en suelo a distancia y suelo rizosférico de cebollín, flor morada, pasto japonesa, tule, tulillo, zacatillo, camalote y pasto alfombra para el DM en la época de seca, revelaron diferencias estadísticas significativas (Tukey $p \leq 0.05$) (Cuadro 16 y 17) según la especie vegetal. También se encontró que la abundancia de especies vegetales fue 1.33 veces más que en la del DM en época de nortes.

La especie vegetal flor morada (*Astereaceae* spp.) asociada con BFN en suelo a distancia evidenció una mayor población con 32×10^4 UFC g^{-1} s.s. (A3, Cuadro 56), pero este mismo grupo de bacterias en suelo rizosférico de camalote la población fue mayor con 276×10^4 UFC g^{-1} s.r. (A3, Cuadro 60), asimismo esta especie vegetal indujo el mayor efecto rizósfera con 159.31 (Cuadro 16) respecto al inducido por las siete especies vegetales restantes.

Por otra parte, las BSP hospedadas en el suelo a distancia de la especie vegetal flor morada (*Astereaceae* spp.) evidenciaron una población mayor de 135×10^4 UFC g^{-1} s.s. (A3, Cuadro 57), la cual fue superior a la encontrada en el suelo rizosférico del pasto japonesa (*Poaceae* spp.), quien presentó una población de 4×10^4 UFC g^{-1} s.r. (A3, Cuadro 61), respecto a las siete especie vegetales observadas en el Cuadro 18. Asimismo, el pasto japonesa indujo el mejor efecto rizósfera con 0.36, en relación a las demás especies vegetales localizadas en La Venta, Tabasco para el DM de la época de sequía.

Cuadro 16. Efecto rizósfera y poblaciones de BFN, BSP y BSK en suelo a distancia y suelo rizosférico por especie vegetal para un día específico en la época de seca.

Especie vegetal	BFN [†]			BSP [‡]			BSK [§]		
	Suelo	Rizósfera	Efecto	Suelo	Rizósfera	Efecto	Suelo	Rizósfera	Efecto
	UFC (x 10 ⁴) g ⁻¹ s.s.	rizósfera	rizósfera	UFC (x 10 ³) g ⁻¹ s.s.	rizósfera	rizósfera	UFC (x 10 ⁴) g ⁻¹ s.s.	rizósfera	rizósfera
Cebollín	6d [†]	37c	9.17c	90f	10c	0.30ab	15b	31c	10.30d
Flor morada	32a	26cd	4.71c	1,350a	8d	0.01c	15b	152b	52.57bc
Pasto japonesa	5d	107b	68.54b	220ef	40a	0.36a	11b	187b	95.58a
Tule	14c	38c	6.16c	390de	30b	0.08bc	12b	107bc	53.33b
Tulillo	2c	14d	5.10c	570cd	7d	0.06bc	20ab	50c	2.42d
Zacatillo	11c	27cd	14.04c	620c	8d	0.03c	20ab	23c	1.74d
Camalote	1d	276a	159.31a	1,250a	10c	0.01c	26a	489a	18.56cd
Pasto alfombra	26b	28cd	1.11c	1,020b	6d	0.01c	14b	101bc	7.61d

[†] Medias con diferente letra dentro de cada columna muestran diferencias estadísticas (Tukey, p<0.05).

[‡] BFN=Bacterias Fijadoras de Nitrógeno, BSP=Bacterias Solubilizadoras de Fosfatos, BSK=Bacterias Solubilizadoras de Potasio.

En cuanto a las BSK, se observó una estrecha relación en el suelo a distancia y suelo rizosférico con la especie vegetal denominada camalote (*Poaceae* spp.), la cual mostró la mayor población con 26×10^4 UFC g⁻¹ s.s. (A3, Cuadro 58) y 49×10^5 UFC g⁻¹ s.r. (A3, Cuadro 62), respectivamente. En cambio, el pasto japonesa (*Poaceae* spp.) indujo un efecto rizósfera con 95.58, siendo el mayor respecto a las demás especies vegetales para este grupo de bacterias (Cuadro 16).

Cuadro 17. Efecto rizósfera y poblaciones de hongos heterótrofos en suelo a distancia y suelo rizosférico por especie vegetal para un día específico de tres épocas del año.

Especie vegetal	Época del año								
	Lluvias [†]			Nortes [‡]			Seca [§]		
	Suelo	Rizósfera	Efecto	Suelo	Rizósfera	Efecto	Suelo	Rizósfera	Efecto
UFC (x 10 ²) g ⁻¹ s.s.	rizósfera	rizósfera	UFC (x 10 ²) g ⁻¹ s.s.	rizósfera	rizósfera	UFC (x 10 ³) g ⁻¹ s.s.	rizósfera	rizósfera	
Pasto alemán	30cd [†]	42bc	1.46de	--	--	--	--	--	--
Pasto arrocillo	1e	8ef	7.89bc	--	--	--	--	--	--
Cebollín	109a	67a	0e	--	--	--	3de	8bc	2.25bc
Pasto egipcio	3e	45b	15.41a	--	--	--	--	--	--
Flor morada	51bc	21de	0.71de	--	--	--	17b	5bc	0.58d
Pasto japonesa	13de	21de	4.35cd	18c	2c	0.13e	6cd	2c	0.50d
Pasto salisaca	127a	22d	0.18e	--	--	--	--	--	--
Tule	2e	28d	10.21b	6d	4c	2.12a	2e	10bc	3.03ab
Tulillo	51bc	67a	1.42de	8d	6bc	0.82cd	4cde	4c	1.37cd
Pasto de hoja ancha	61b	45b	0.73de	29b	15b	0.52de	--	--	--
Zacatillo	19ed	54ab	2.79de	41a	54a	1.15bc	7c	4c	0.83cd
Camalote	126a	30cd	0.24e	--	--	--	21a	14b	0.68d
Hoja de laguna	--	--	--	4d	5c	1.43b	--	--	--
Pasto alfombra	--	--	--	--	--	--	18b	72a	3.91a

[†] Medias con diferente letra dentro de cada columna muestran diferencias estadísticas (Tukey, p<0.05).

-- No se cuantificó.

[‡] Hace referencia al 30 de septiembre de 2009 (lluvias), 30 de enero del 2010 (nortes) y 30 de abril del 2010 (seca).

En lo que respecta a los hongos heterótrofos en suelo a distancia se observó que la especie vegetal camalote (*Poaceae* spp.) desarrolló una población de 21×10^3 UFC g^{-1} s.s. (A3, Cuadro 59), mientras que en el suelo rizosférico el pasto alfombra (*Poaceae* spp.) se caracterizó por presentar una población de 72×10^3 UFC g^{-1} s.r. (A3, Cuadro 63), y a su vez un efecto rizósfera de 3.91 para esta misma especie vegetal, siendo las gramíneas las mejores especies que mejor se adaptan a estas condiciones (Cuadro 17).

Capítulo III. Estado actual y relación entre AP e HTP en el área evaluada para un día específico de cada época del año

6.3.1. Relación de variables respuesta con la presencia de AP

6.3.1.1. Nitrógeno total

La AP por época del año influyó en los contenidos de N total del suelo para la superficie evaluada (44,321.199 m²), y mostró diferencias estadísticas significativas (Tukey, $p \leq 0.05$) (Figura 17). Durante la época de lluvia se presentó una AP de 371.8 mm y un contenido de 0.27 % de N total el DM de la época de lluvia en toda la superficie evaluada con una correlación inversa ($r^2=0.83$, $p=0.01$) con la AP presente.

El N total se clasificó como un contenido muy alto de acuerdo a los criterios establecidos por la NOM-021-RECNAT-2000 (DOF, 2002). En cambio para el DM de la época de nortes el contenido mostró ser alto con 0.19 % con una AP de 2,078.2 mm. Lo anterior ocasionó una reducción del 1.42 veces el contenido de N total respecto al DM de la época de lluvias y posiblemente se encuentre relacionado con la dispersión de N total por efecto de las corrientes de agua provenientes del desbordamiento del Río Tonalá.

Al igual que el DM de la época de nortes y de la época de seca el contenido de N total se clasificó como alto con un valor de 0.22 % en presencia de una AP de 51.2 mm. Esto representó un incremento de 1.16 veces respecto al DM de la época de nortes.

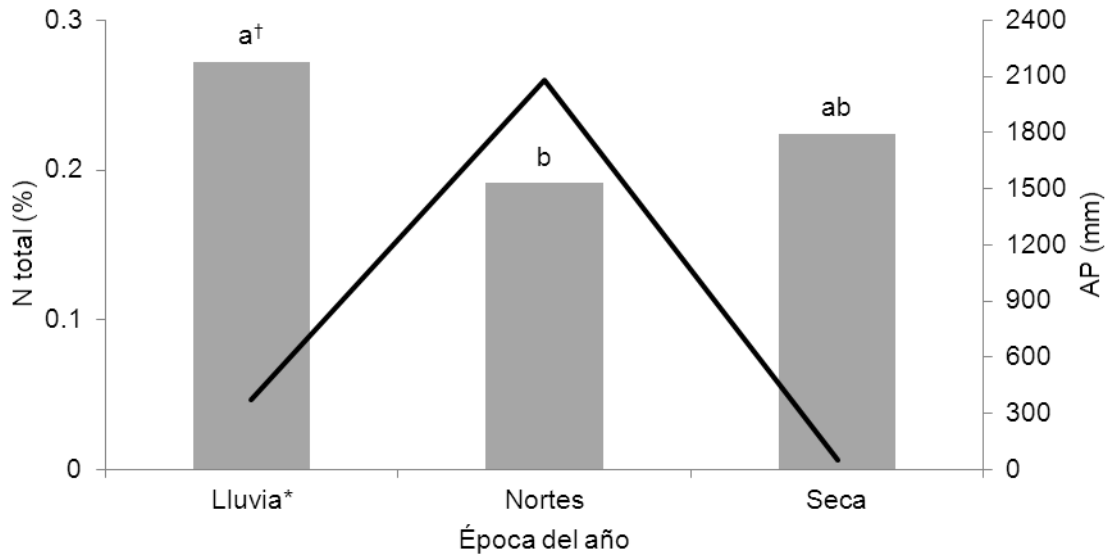


Figura 17. Efecto de la AP sobre el contenido de N total para un día específico de cada época del año. († Letra diferente, indica diferencias estadísticas significativas Tukey, $p \leq 0.05$) (* Hace referencia al 30 de septiembre de 2009 (lluvias), 30 de enero del 2010 (nortes) y 30 de abril del 2010 (seca))

6.3.1.2. Fósforo disponible

El DM para cada época del año no presentó diferencias estadísticas significativas (Tukey, $p \leq 0.05$) sobre el contenido de P disponible en la superficie evaluada ($44,321.199 \text{ m}^2$) (Figura 18). La presencia de una AP de 371.8 mm en la época de lluvias y un contenido medio de P disponible (21.16 mg kg^{-1} base seca), para el DM en esta época, se representó mediante una correlación inversa ($r^2=0.38$, $p=0.05$).

El DM en la época de nortes respecto al DM de la época de lluvias el contenido de P disponible aumentó 1.17 veces, en asociación con una AP de 2,078.2 mm, lo anterior presentó una correlación inversa ($r^2=0.73$, $p=0.01$). Por otra parte, el DM en la época de seca presentó un contenido de 18.97 mg kg^{-1} base seca de P disponible, es decir, representa una disminución de 1.30 veces el DM en la época de seca, respecto al DM en la época de lluvia. Lo anterior, mostró una correlación inversa ($r^2=0.76$, $p=0.01$) al presentarse una AP de 51.2 mm.

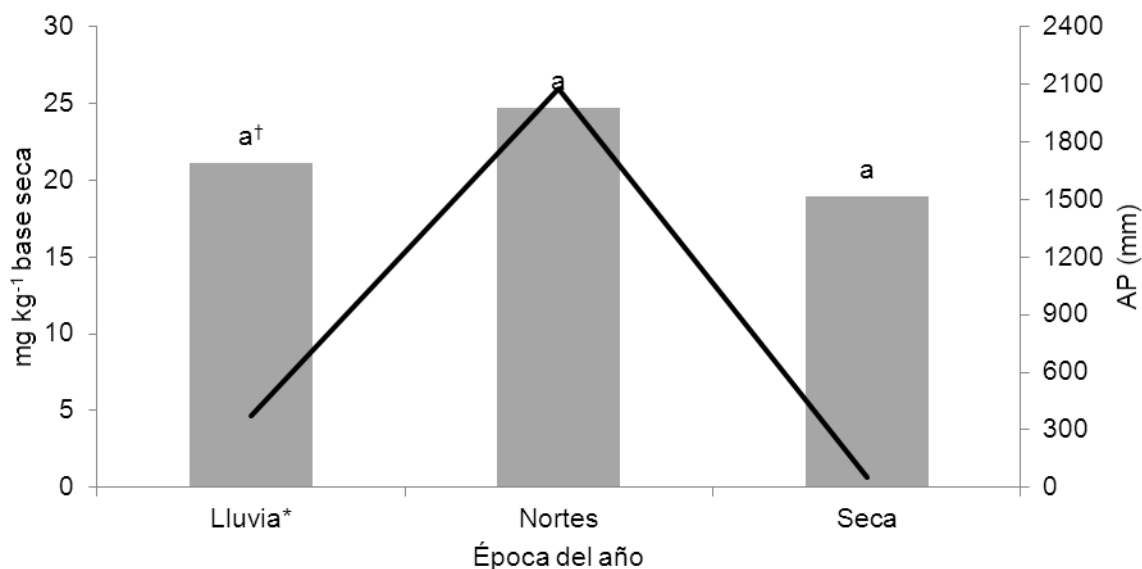


Figura 18. Efecto de la AP sobre el contenido de P disponible para un día específico de cada época del año. († Letra diferente, indica diferencias estadísticas significativas Tukey, $p \leq 0.05$) (* Hace referencia al 30 de septiembre de 2009 (lluvias), 30 de enero del 2010 (nortes) y 30 de abril del 2010 (seca)).

6.3.1.3. Hidrocarburos totales del petróleo

Los efectos del DM para cada época del año sobre los contenidos de HTP en toda la superficie evaluada (44,321.199 m²) fueron estadísticamente significativos (Tukey, $p \leq 0.05$) (Figura 19). Los HTP fueron estadísticamente iguales según las muestras tomadas por toda la superficie evaluada en época de lluvias y nortes, pero estas fueron mayores respecto a los contenidos localizados en época de sequía (Figura 19).

El contenido de HTP en el área evaluada para el DM en la época de lluvias fue de 90,714 mg kg⁻¹ base seca en presencia de una AP de 371.8 mm, mientras que para el DM en época de nortes, el contenido de HTP presentó un aumento de 5,279 mg kg⁻¹ base seca, con una AP de 2,078.2 mm (Figura 19).

Este aumento de los HTP para el DM en época de lluvias y nortes, puede estar relacionado con el aumento superficial de una lámina de agua que oscila de 70 a 200 cm, derivado de las altas precipitaciones antes mencionadas durante las dos épocas del año, así como del desbordamiento de arroyos cercanos al sitio de estudio, lo cual trajo consigo mismo, el arrastre de hidrocarburos del petróleo desde otros sitios para acumularse en estos suelos, reconvirtiéndose en un ambiente acuático, originando una adhesión de los hidrocarburos derramados a los sedimentos debido a su baja solubilidad con el agua y a su carácter hidrofóbico.

En base a lo anterior, Reeves (2000) y Celis (2009a) afirman que en ambientes acuáticos los hidrocarburos son menos densos que el agua, entre los que se encuentran a la gasolina, diesel, petróleo, compuestos como el benceno, tolueno, etilbenceno y xileno, entre otros, quienes forman capas de iridiscencia sobre el agua, flotan libremente en forma de emulsión, se encuentran disueltos o adsorbidos a sólidos suspendidos, mientras que los HTP más densos que el agua como el benceno, tetracloruro de carbono, cloroformo, entre otros compuestos (Botello, 2005) se lixivian hacia los mantos acuíferos quedando retenidos dentro de los poros y fracturas del suelo debido a las fuerzas capilares (Celis, 2009a).

En cambio, el DM en época de seca se caracterizó por presentar una disminución de $70,882 \text{ mg kg}^{-1}$ base seca, respecto al DM en época de nortes, es decir se cuantificó un contenido de $25,111 \text{ mg kg}^{-1}$ base seca, lo cual mostró una correlación directa ($r^2=0.82$, $p=0.01$) con una AP de 51.2 mm (Figura 19).

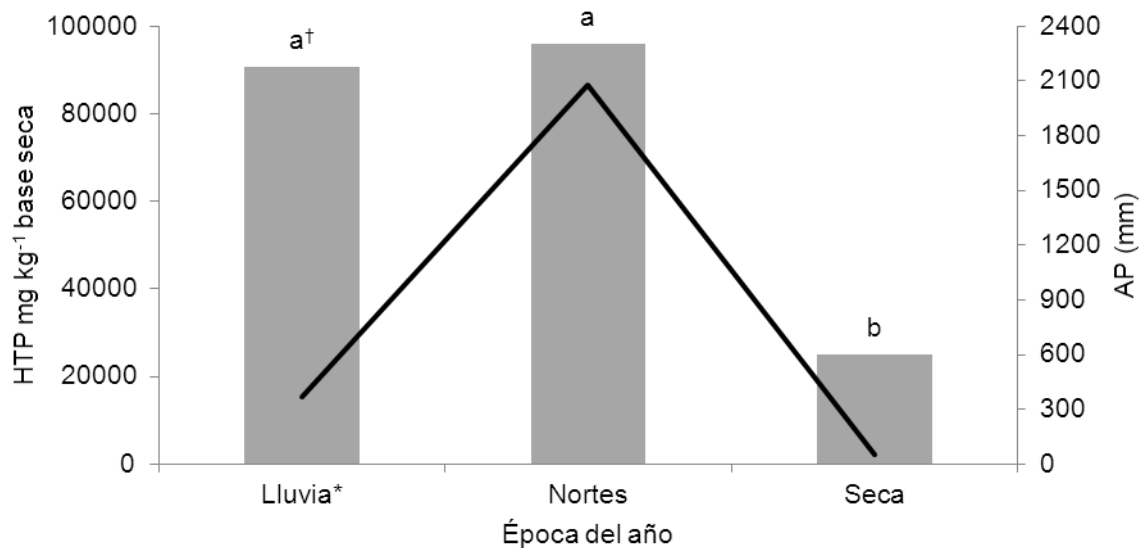


Figura 19. Efecto de la AP sobre el contenido de HTP para un día específico de cada época del año. († Letra diferente, indica diferencias estadísticas significativas Tukey, $p \leq 0.05$) (* Hace referencia al 30 de septiembre de 2009 (lluvias), 30 de enero del 2010 (nortes) y 30 de abril del 2010 (seca)).

6.3.1.4. Biomasa aérea vegetal

La producción de biomasa aérea seca vegetal para un día específico de cada época del año mostró diferencias estadísticas significativas (Tukey, $p \leq 0.05$) (Cuadro 18). El DM en época de lluvias se caracterizó por presentar una producción de biomasa aérea seca de 4,221.3 g en el área evaluada, representada por una diversidad de 12 especies vegetales, donde ocho de ellas son pastos que se utilizan principalmente para el consumo pecuario (Cuadro 18), todo lo anterior se relacionó con una AP de 371.8 mm (Figura 20).

En cambio, para el DM en época de nortes reflejó una disminución de 7.44 veces, respecto al DM en época de lluvias, es decir, se efectuó una producción de biomasa aérea seca de 567 g, sin embargo, las altas precipitaciones (2,078.2 mm) durante esta época ocasionaron *In situ* el aumento superficial de la lamina de agua (200 cm de altura), provocando un efecto negativo en la producción de biomasa y en la diversidad vegetal, predominando tan solo seis especies vegetales (Cuadro 18).

El DM en época de seca reflejó una producción de biomasa aérea seca de 2,396 g con una diversidad de ocho especies vegetales (Cuadro 18), de las cuales cuatro son pastos, aunado a esto, se encontró una correlación directa ($r^2=0.95$, $p=0.01$) con una AP de 51.2 mm (Figura 20), que caracterizó a este muestreo por la presencia en la recuperación tanto de especies vegetales como en la producción de biomasa aérea.

Cuadro 18. Efecto del DM por época del año sobre el número de especies vegetales y producción de biomasa aérea seca en toda la superficie evaluada.

	Época del año/especie vegetal		
	Lluvia [†]	Nortes	Seca
Pasto alemán (<i>Poaceae</i> spp.)		Pasto japonesa (<i>Poaceae</i> spp.)	Pasto alfombra (<i>Poaceae</i> spp.)
Pasto arrocillo (<i>Poaceae</i> spp.)		Hoja de laguna (<i>Nymphaeaceae</i> spp.)	Camalote (<i>Poaceae</i> spp.)
Camalote (<i>Poaceae</i> spp.)		Tule (<i>Juncaceae</i> spp.)	Cebollín (<i>Cyperaceae</i> spp.)
Cebollín (<i>Cyperaceae</i> spp.)		Tulillo (<i>Cyperaceae</i> spp.)	Flor morada (<i>Astereaceae</i> spp.)
Pasto egipto (<i>Poaceae</i> spp.)		Pasto de hoja ancha (<i>Poaceae</i> spp.)	Pasto japonesa (<i>Poaceae</i> spp.)
Flor morada (<i>Astereaceae</i> spp.)		Zacatillo (<i>Poaceae</i> spp.)	Tule (<i>Juncaceae</i> spp.)
Pasto japonesa (<i>Poaceae</i> spp.)			Tulillo (<i>Cyperaceae</i> spp.)
Pasto salisaca (<i>Poaceae</i> spp.)			Zacatillo (<i>Poaceae</i> spp.)
Tule (<i>Juncaceae</i> spp.)			
Tulillo (<i>Cyperaceae</i> spp.)			
Pasto de hoja ancha (<i>Poaceae</i> spp.)			
Zacatillo (<i>Poaceae</i> spp.)			
Biomasa aérea seca (g)	4221.30a [†]	567c	2396b

[†] Biomasa acumulada con diferente letra muestra diferencias estadísticas (Tukey, $p<0.05$).

[†] Hace referencia al 30 de septiembre de 2009 (lluvias), 30 de enero del 2010 (nortes) y 30 de abril del 2010 (seca).

6.3.1.5. Macrofauna

La macrofauna del suelo para el DM en época de lluvias en el área evaluada (44,321.199 m²) presentó una abundancia de 3 individuos m⁻², en asociación con una AP de 371.8 mm, así como el aumento del agua en el nivel superficial a una altura promedio de hasta 70 cm. En cambio, el DM en época de nortes presentó un aumento de 18.67 veces la el número de individuos, respecto al DM de la época de lluvias, es decir se encontró una abundancia de 56 individuos m⁻², la cual se correlacionó de manera inversa ($r^2=0.60$, $p=0.01$) con una AP de 2,078.2 mm (Figura 21) y el aumento de 200 cm el nivel del agua sobre la superficie del suelo.

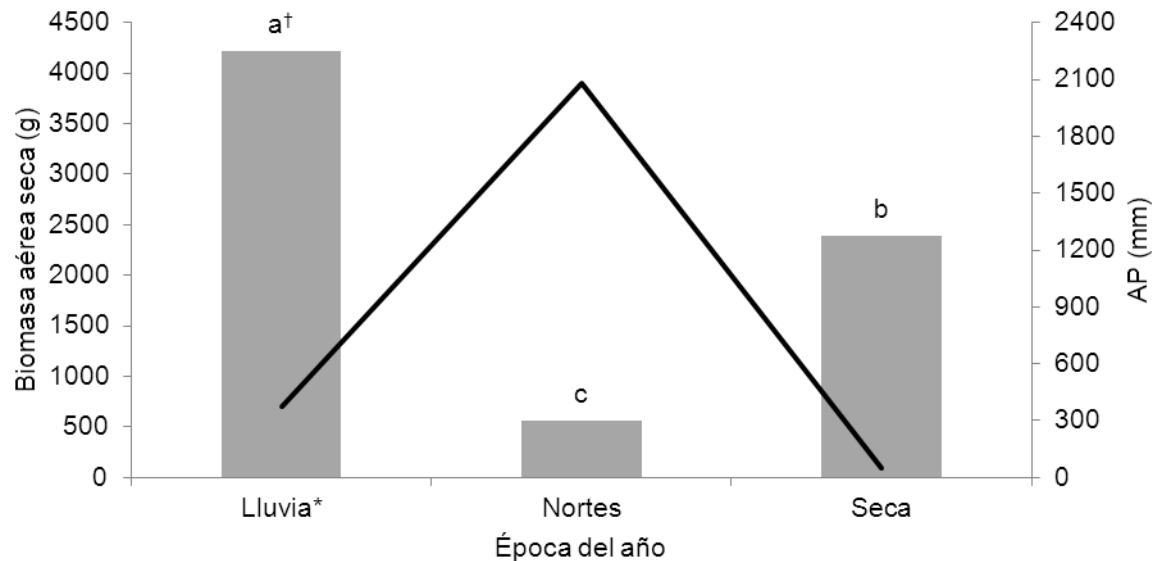


Figura 20. Efecto de la AP sobre la producción de biomasa aérea seca para un día específico para cada época del año. († Letra diferente, indica diferencias estadísticas significativas Tukey, $p \leq 0.05$) (* Hace referencia al 30 de septiembre de 2009 (lluvias), 30 de enero del 2010 (nortes) y 30 de abril del 2010 (seca)).

Por otra parte, el DM en época de seca se caracterizó por presentar una AP de 51.2 mm, lo que permitió observar un aumento en la abundancia (98 individuos m^{-2}) (Figura 21). Aunque se ha encontrado que el contenido de agua en el suelo representa un serio problema para las comunidades de *Arachnida*, *Insecta*, *Gastropoda* y *Huridinea*, así como las comunidades de *Collembola* (Uribe-Hernández *et al.*, 2010).

6.3.1.6. Poblaciones de bacterias y hongos

El efecto del DM por época del año para las medias de cada una de las poblaciones de BFN, BSP, BSK y HH en suelo a distancia y suelo rizosférico para el total de las especies vegetales que se localizaron en la superficie evaluada, mostraron diferencias estadísticas significativas (Tukey, $p \leq 0.05$) (Figura 22a, 22b, 22c y 22d).

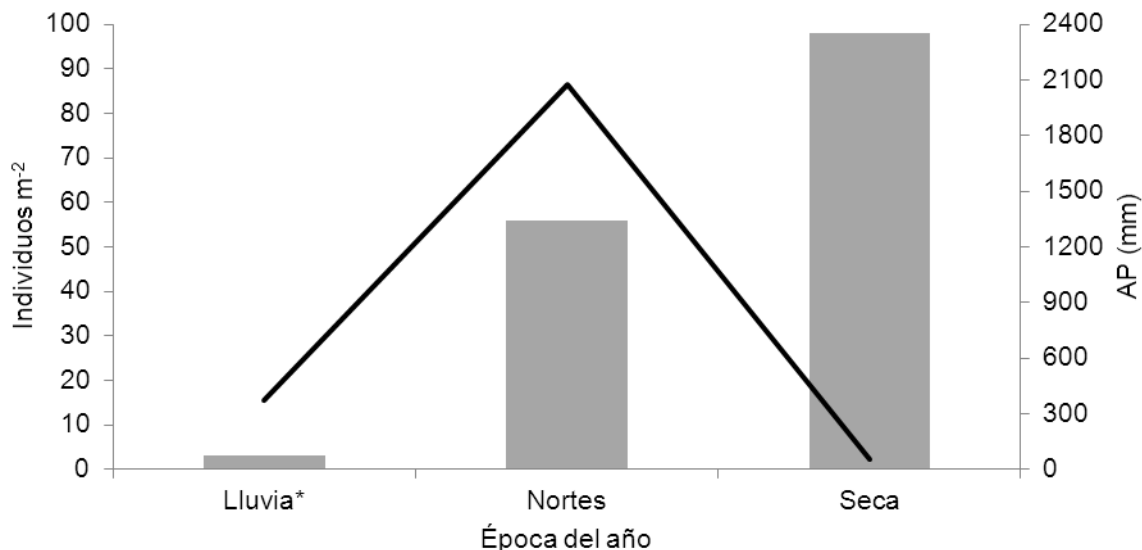


Figura 21. Efecto de la AP sobre la abundancia de la macrofauna para un día específico de cada época del año. (* Hace referencia al 30 de septiembre de 2009 (lluvias), 30 de enero del 2010 (nortes) y 30 de abril del 2010 (seca)).

La mejor población de BFN para el suelo a distancia ($21 \times 10^4 \text{ UFC g}^{-1}$) se encontró el DM en época de lluvias, mientras que el DM para la época de seca se encontró la mejor población en el suelo rizosférico ($56 \times 10^4 \text{ UFC g}^{-1}$) al presentarse una AP de 51.2 mm, aunque las BFN en suelo rizosférico para el DM en época de lluvias se correlacionó de manera inversa ($r^2=0.87$, $p=0.01$) con una AP de 371.8 mm.

Por otra parte, el DM en época de nortes las BFN se redujeron, presentando una población de $42 \times 10^2 \text{ UFC g}^{-1}$ en suelo a distancia, pero en suelo rizosférico se encontró una población de $41 \times 10^3 \text{ UFC g}^{-1}$, esto se correlacionó en forma directa ($r^2=0.61$, $p=0.01$) con una AP de 2,078.2 mm (Figura 22a).

Las BSP el DM en época de lluvias presentó altas poblaciones en suelo a distancia ($30 \times 10^5 \text{ UFC g}^{-1}$) y en suelo rizosférico con una población de $34 \times 10^5 \text{ UFC g}^{-1}$, lo cual se correlacionó de manera directa ($r^2=0.42$, $p=0.05$) con una AP de 371.8 mm.

En cambio, al presentarse en época de nortes una AP de 2,078.2 mm en el área evaluada, provocó una reducción en la población de BSP del suelo a distancia ($48 \times 10^1 \text{ UFC g}^{-1}$) el DM para esta misma época, respecto al DM en época de lluvias, así como la presencia de una correlación directa ($r^2=0.48$, $p=0.05$) con una población de $55 \times 10^4 \text{ UFC g}^{-1}$ de suelo rizosférico. Aunque en la época de seca, al disminuir la AP (51.2 mm) respecto a la época de nortes, se observó el DM de la época de seca una población de $61 \times 10^4 \text{ UFC g}^{-1}$ para el suelo a distancia y una menor población ($19 \times 10^3 \text{ UFC g}^{-1}$) para el suelo rizosférico (Figura 22b).

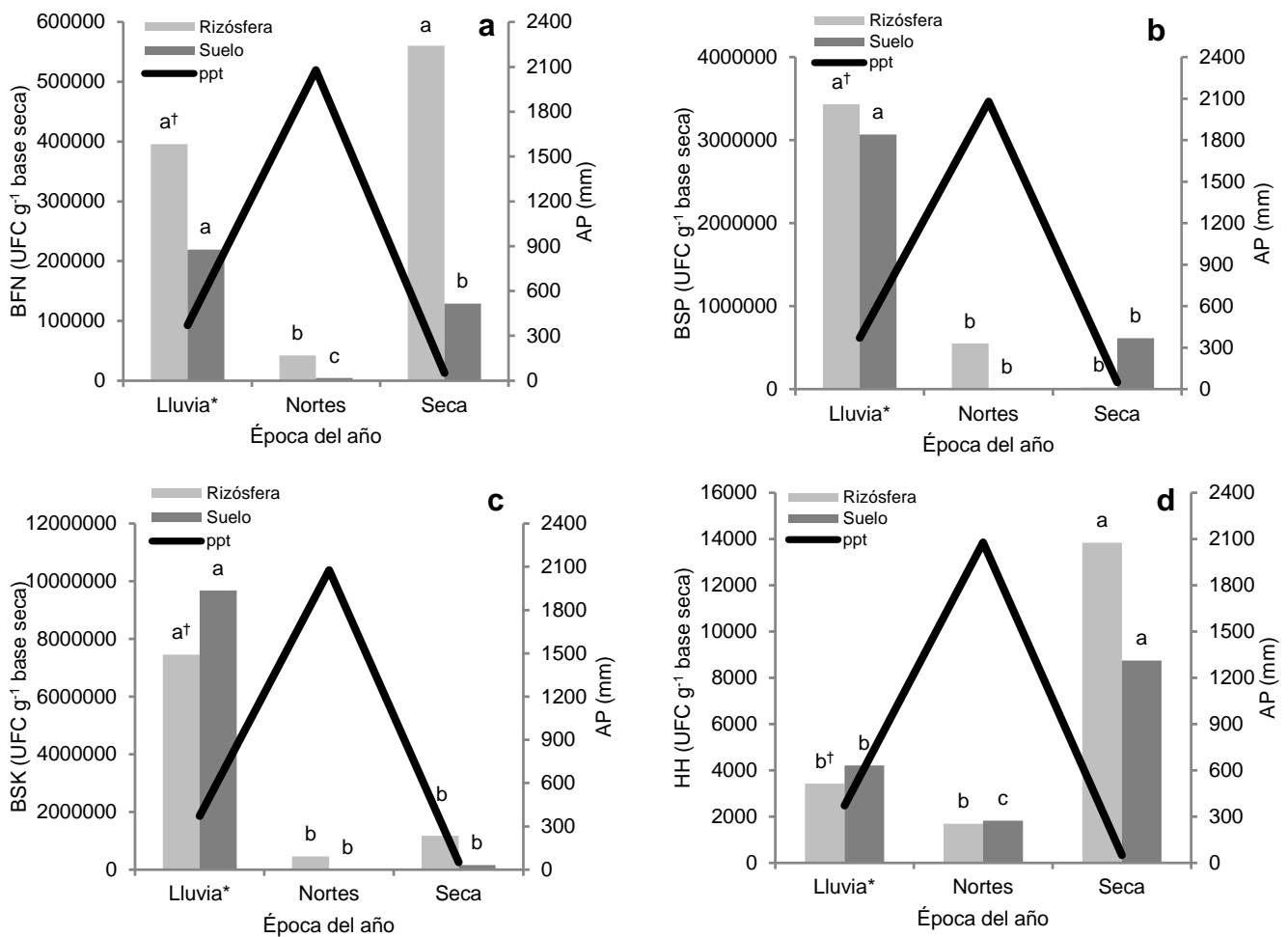


Figura 22. Efecto de la AP sobre las poblaciones de: a) BFN, b) BSP, c) BSK y d) HH, en suelo a distancia y suelo rizosférico para un día específico de cada época del año. († Letra diferente, indica diferencias estadísticas significativas Tukey, $p \leq 0.05$) (* Hace referencia al 30 de septiembre de 2009 (lluvias), 30 de enero del 2010 (nortes) y 30 de abril del 2010 (seca)).

La mayor población de BSK se localizaron el DM de la época de lluvias para el suelo a distancia (96×10^5 UFC g^{-1}), y para el suelo rizosférico (74×10^5 UFC g^{-1}), la cual se correlacionó de manera directa ($r^2=0.62$, $p=0.01$) con una AP de 371.8 mm. (Figura 22c). Por otra parte, la época de nortes se caracterizó por presentar una alta AP (2,078.2 mm), respecto a la época de lluvias y seca, esto trajo como consecuencia una inhibición en el crecimiento de las BSK el DM en época de nortes, para el suelo a distancia (95×10^2 UFC g^{-1}) y suelo rizosférico (46×10^4 UFC g^{-1}).

Sin embargo, la época de seca mostró una AP de 51.2 mm, lo que propició un aumento de las BSK el DM, respecto al DM de la época de nortes, para el suelo a distancia (16×10^4 UFC g^{-1}) y en el suelo rizosférico (11×10^5 UFC g^{-1}) quien se correlacionó de manera inversa ($r^2=0.55$, $p=0.01$) con la AP en la época de seca (Figura 22c).

Las poblaciones de HH para el DM en época de seca, mostró una mayor población de 87×10^2 UFC g^{-1} en suelo a distancia, mientras que en suelo rizosférico se presentó con una población de 13×10^3 UFC g^{-1} , esto se asoció con una AP de 371.8 mm. En cambio, la alta precipitación acumulada (2,078.2) en la época de nortes reflejó una disminución en la población de HH para el DM de esta época, tanto en suelo a distancia, como en suelo rizosférico, respecto al DM de la época de seca.

Por otra parte, el DM en época de lluvias respecto al DM en época de nortes mostró una mejor respuesta al crecimiento de HH, tanto en suelo a distancia (42×10^2 UFC g^{-1}) como en suelo rizosférico (34×10^2 UFC g^{-1}) quien presentó una correlación directa ($r^2=0.59$, $p=0.01$) con una AP de 371.8 mm (Figura 22d).

6.3.2. Relación de variables respuesta con la presencia de HTP

6.3.2.1. Carbono orgánico

El contenido de C org para el DM por época del año, mostró diferencias estadísticas significativas (Tukey, $p \leq 0.05$) (Figura 23). El DM de la época de lluvias en presencia de $90,714 \text{ mg kg}^{-1}$ de HTP base seca, presentó una formación de 13.29 % de C org, en cambio, para el DM en época de nortes el contenido de HTP en el área evaluada fue de $95,993 \text{ mg kg}^{-1}$ base seca, lo cual provocó una reducción de 1.29 veces, respecto al DM de la época de lluvias (Figura 23).

En cambio, el DM en época de seca, respecto al DM en época de nortes presentó un aumento de 1.11 veces el contenido de C org, es decir, se obtuvo una formación de 11.49 %, que se correlacionó de manera directa ($r^2=0.44$, $p=0.01$) con un contenido de $25,111 \text{ mg kg}^{-1}$ de HTP para el total del área evaluada (Figura 23).

Este comportamiento del C org posiblemente se debe a lo que menciona Calva-Benítez *et al.*, (2006) que el aporte de carbón orgánico (en promedio 4.14 %) proviene de fuentes tanto autóctonas, como alóctonas (por medio de la descarga fluvial), demostrado que sitios como el sistema lagunar de Chantuto-Panzacola, Chiapas presentan diferencias entre las estaciones de secas y de lluvias.

6.3.2.2. Nitrógeno total

El contenido de N total presentó diferencias estadísticas significativas (Tukey, $p \leq 0.05$) para el DM de cada época del año (Figura 24). El DM en época de lluvias tuvo un valor de 0.27 % de N total en presencia de un contenido de HTP de $90,714 \text{ mg kg}^{-1}$ base seca. Sin embargo, para el DM en época de nortes se presentó un decremento de 1.42 veces, respecto al DM en época de lluvias, lo cual se correlacionó de manera inversa ($r^2=0.16$, $p=0.05$) con $95,993 \text{ mg kg}^{-1}$ de HTP base seca.

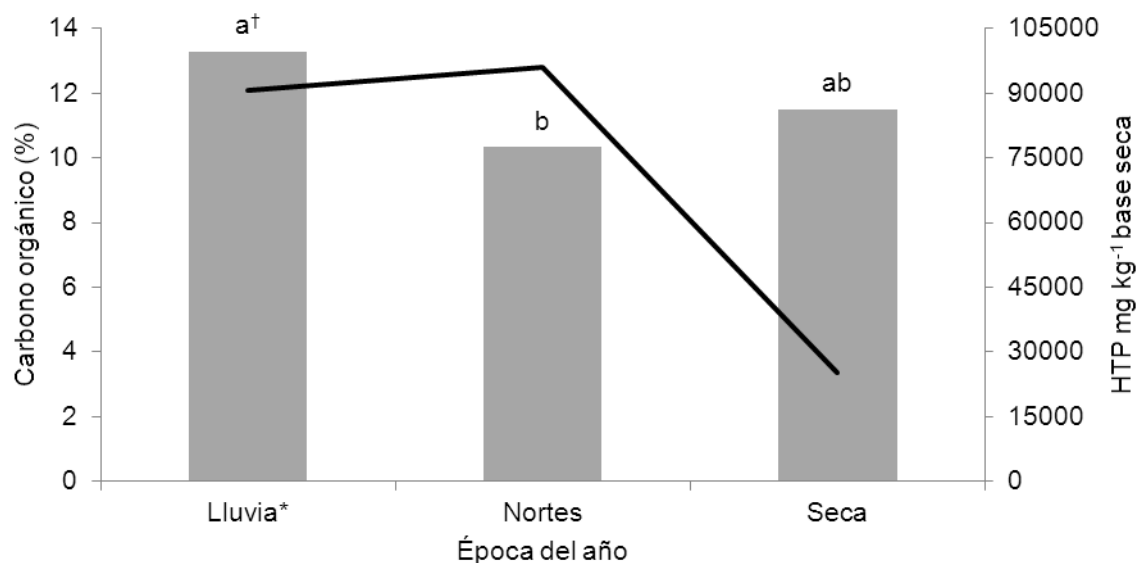


Figura 23. Efecto de los HTP sobre el contenido de carbono orgánico para un día específico de cada época del año. († Letra diferente, indica diferencias estadísticas significativas Tukey, $p \leq 0.05$) (* Hace referencia al 30 de septiembre de 2009 (lluvias), 30 de enero del 2010 (nortes) y 30 de abril del 2010 (seca)).

Aunque, la disminución de $70,882 \text{ mg kg}^{-1}$ de HTP base seca el DM en época de seca, en comparación con el DM de la época de nortes, reflejó una correlación directa ($r^2=0.54$, $p=0.01$) con la formación de 0.22 % de N total para el muestreo de la época de seca (Figura 24).

6.3.2.3. Fósforo disponible

Los contenidos de P disponible no mostraron diferencias estadísticas significativas para el DM de cada época del año (Tukey, $p \leq 0.05$) (Figura 25). Asimismo, el DM en época de lluvias presentó una formación de 21.16 mg kg^{-1} base seca en presencia de un contenido de $90,714 \text{ mg kg}^{-1}$ de HTP base seca. Esto representó un aumento de 1.17 veces el contenido de P disponible el DM en época de nortes, asociado con una mayor presencia de HTP ($95,993 \text{ mg kg}^{-1}$ base seca) respecto al DM en época de lluvias y seca.

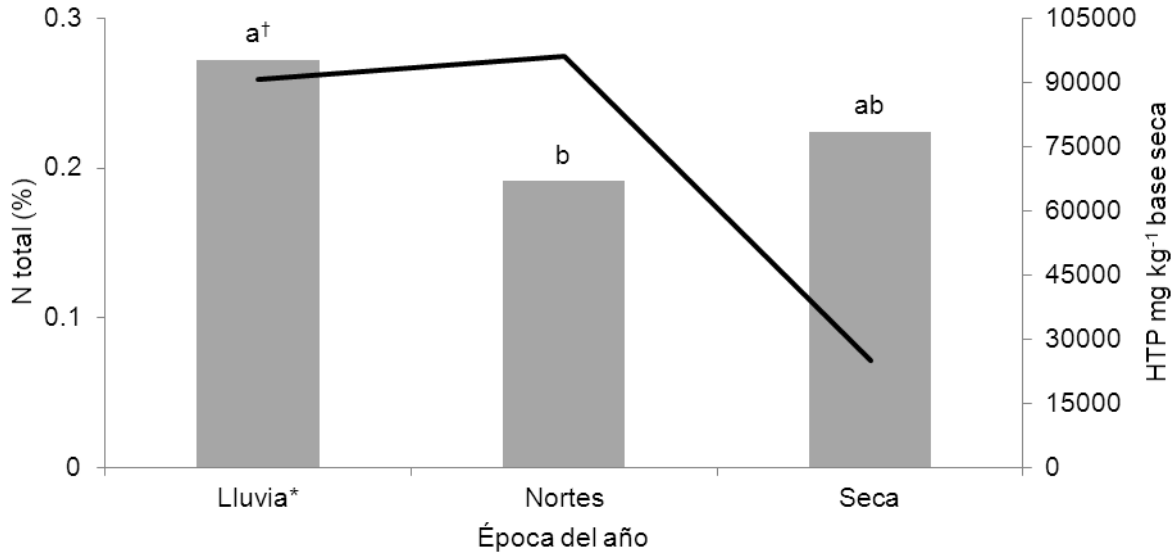


Figura 24. Efecto de los HTP sobre el contenido N total para un día específico de cada época del año. († Letra diferente, indica diferencias estadísticas significativas Tukey, $p \leq 0.05$) (* Hace referencia al 30 de septiembre de 2009 (lluvias), 30 de enero del 2010 (nortes) y 30 de abril del 2010 (seca)).

La cantidad de P disponible que se cuantificó el DM en época de seca (18.97 mg kg^{-1} base seca), mostró una correlación directa ($r^2=0.76$, $p=0.01$) con la concentración $25,111 \text{ mg kg}^{-1}$ de HTP base seca, lo anterior se relacionó con el decremento de $70,882 \text{ mg kg}^{-1}$ de HTP, así como la disminución de 1.30 veces el contenido de P disponible del DM en época de seca, respecto al DM en época de nortes (Figura 25).

6.3.2.4. Biomasa aérea vegetal

La producción de biomasa aérea seca vegetal presentó diferencias estadísticas significativas (Tukey, $p \leq 0.05$) para el DM en cada época del año (Figura 26). En tanto, el DM en época de lluvias ($4,221.3 \text{ g}$) para el área evaluada fue mayor, respecto al DM en época de nortes y seca, en presencia de $90,714 \text{ mg kg}^{-1}$ de HTP base seca, lo anterior presentó una correlación inversa ($r^2=0.26$, $p=0.01$) entre la biomasa aérea seca y el contenido de HTP para el DM en época de lluvias.

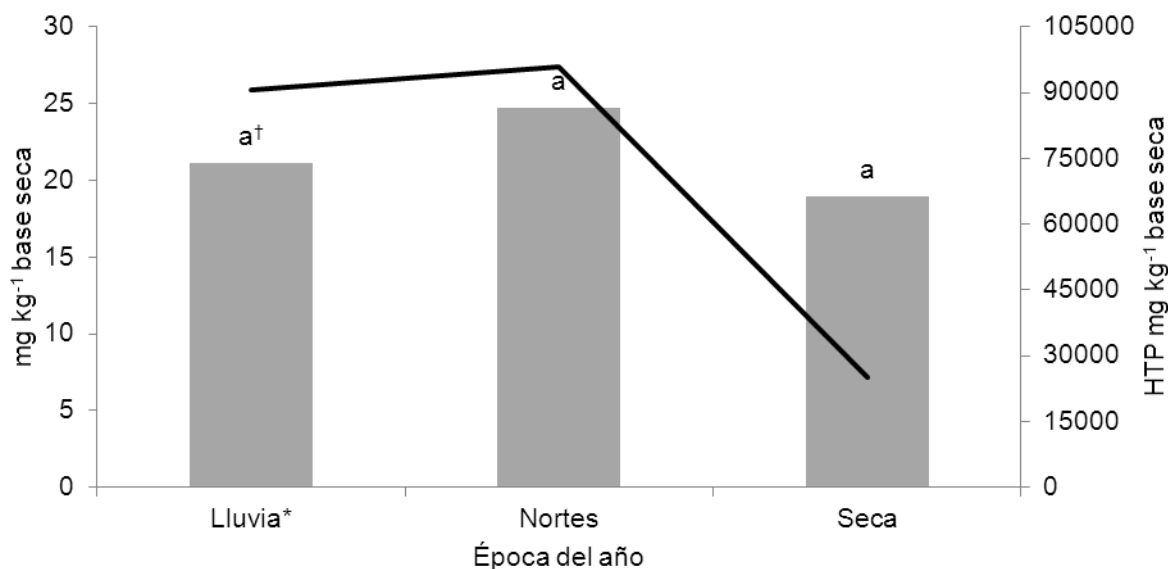


Figura 25. Efecto de los HTP sobre el contenido P disponible para un día específico de cada época del año. († Letra diferente, indica diferencias estadísticas significativas Tukey, $p \leq 0.05$) (* Hace referencia al 30 de septiembre de 2009 (lluvias), 30 de enero del 2010 (nortes) y 30 de abril del 2010 (seca)).

Sin embargo, el DM en época de nortes, respecto al DM en época de lluvias, se observó una disminución de 7.44 veces la producción de biomasa aérea seca, a medida que los HTP reflejaron un aumento de $5,279 \text{ mg kg}^{-1}$ base seca, es decir se presentó una formación de 567 g de biomasa aérea. Por otra parte, el DM en la época de seca reflejó una producción de biomasa aérea de 2,396 g, que se representó como un aumento de 4.22 veces, respecto al DM en la época de nortes, esto se correlacionó de manera directa ($r^2=0.22$, $p=0.05$) con un contenido de HTP de $25,111 \text{ mg kg}^{-1}$ base seca (Figura 26).

6.3.2.5. Poblaciones de bacterias y hongos

Las poblaciones de BFN, BSP, BSK y HH, mostraron diferencias estadísticas significativas (Tukey, $p \leq 0.05$) para un día específico de cada época del año en suelo a distancia y suelo rizosférico (Figura 27a, 27b, 27c y 27d).

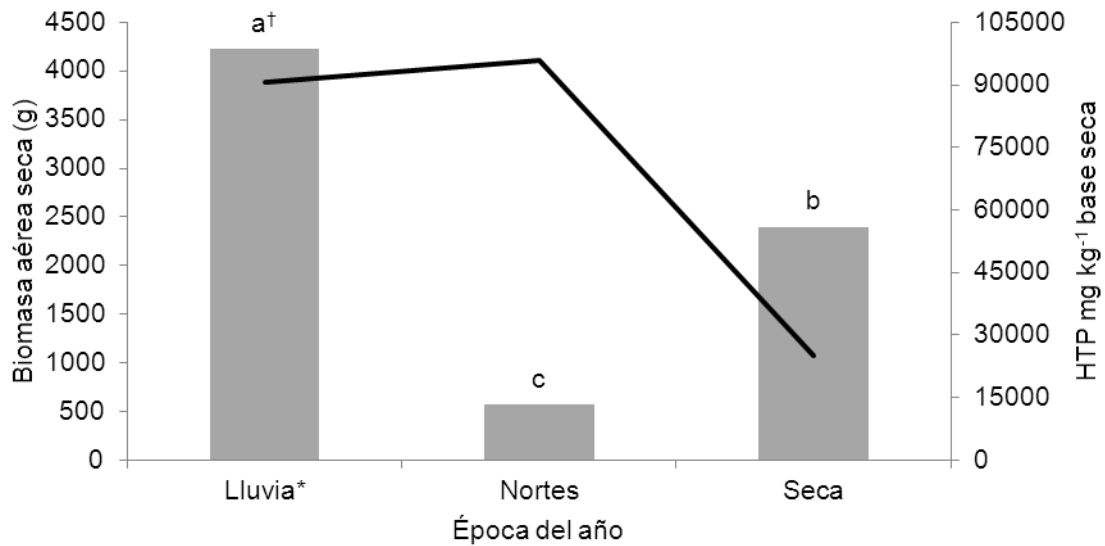


Figura 26. Efecto de los HTP sobre la producción de biomasa aérea vegetal para un día específico de cada época del año. († Letra diferente, indica diferencias estadísticas significativas Tukey, $p \leq 0.05$) (* Hace referencia al 30 de septiembre de 2009 (lluvias), 30 de enero del 2010 (nortes) y 30 de abril del 2010 (seca)).

Las poblaciones de BFN en suelo a distancia fueron mayores (21×10^4 UFC g⁻¹ s.s.) el DM en la época de lluvias, las cuales crecieron en presencia de 90,714 mg kg⁻¹ de HTP base seca, mientras que en suelo rizosférico el DM en época de seca mostraron una población mayor con 56×10^4 UFC g⁻¹ s.r., al disminuir 70,882 mg kg⁻¹ de HTP base seca del DM en época de seca, respecto al DM en época de nortes, esto indica que a menor contenido de hidrocarburos, las BFN en suelo rizosférico presentan una tendencia a aumentar.

En cambio, al presentarse un aumento en el contenido de HTP (5,279 mg kg⁻¹ base seca) el DM en época de nortes, en comparación con el DM en época de lluvias, las BFN tanto en suelo a distancia como en suelo rizosférico inhibieron su crecimiento, mostrando poblaciones de 4×10^3 y 41×10^3 UFC g⁻¹ base seca, respectivamente (Figura 27a). Sin embargo, las poblaciones de BFN en suelo rizosférico presentaron una correlación directa ($r^2=0.68$, $p=0.01$) con el contenido de HTP presentes el DM en la época de nortes.

Las BSP tanto en suelo a distancia como en suelo rizosférico resultaron ser mayores con poblaciones de 30×10^5 y 34×10^5 UFC g^{-1} base seca, respectivamente, para el DM en época de lluvia, en presencia de $90,714 \text{ mg kg}^{-1}$ de HTP base seca. Aunque el DM en época de nortes en contenidos de $95,993 \text{ mg kg}^{-1}$ de HTP base seca las BSP en suelo a distancia se inhibieron hasta una población de 48×10^1 UFC g^{-1} s.s., mientras que en suelo rizosférico se presentó una población de 55×10^4 UFC g^{-1} s.r.

La reducción de $70,882 \text{ mg kg}^{-1}$ de HTP base seca para el DM en época de seca, respecto al DM de la época de nortes, evidenció un aumento de las poblaciones de BSP en suelo a distancia (61×10^4 UFC g^{-1} s.s.) y una reducción en el crecimiento de las poblaciones en suelo rizosférico (19×10^3 UFC g^{-1} s.r) (Figura 27b).

Al igual que las BSP, las BSK mostraron la misma tendencia a disminuir las poblaciones el DM en época de nortes. El DM dentro de la época de lluvias se caracterizó por presentar una población de 96×10^5 UFC g^{-1} para el suelo a distancia y 74×10^5 UFC g^{-1} en suelo rizosférico, en presencia de $90,714 \text{ mg kg}^{-1}$ de HTP base seca. En cambio, para el DM en época de nortes el aumento de $5,279 \text{ mg kg}^{-1}$ de HTP base seca, respecto al DM de la época de lluvias, afectó el crecimiento de las poblaciones de BSK, mostrando una densidad de 95×10^2 UFC g^{-1} en el suelo a distancia, mientras que en suelo rizosférico se encontró una población de 46×10^4 UFC g^{-1} , lo cual se correlacionó de manera directa ($r^2=0.18$, $p=0.05$) con el contenido de HTP ($95,993 \text{ mg kg}^{-1}$ base seca) presente el DM en época de nortes.

Por otra parte, el DM de la época de seca, al presentar una disminución de $70,882 \text{ mg kg}^{-1}$ de HTP base seca el DM en época de seca, respecto al DM en época de nortes, evidenció un aumento de la población de BSK en el suelo a distancia (16×10^4 UFC g^{-1}), así como en suelo rizosférico (11×10^5 UFC g^{-1}) (Figura 27c).

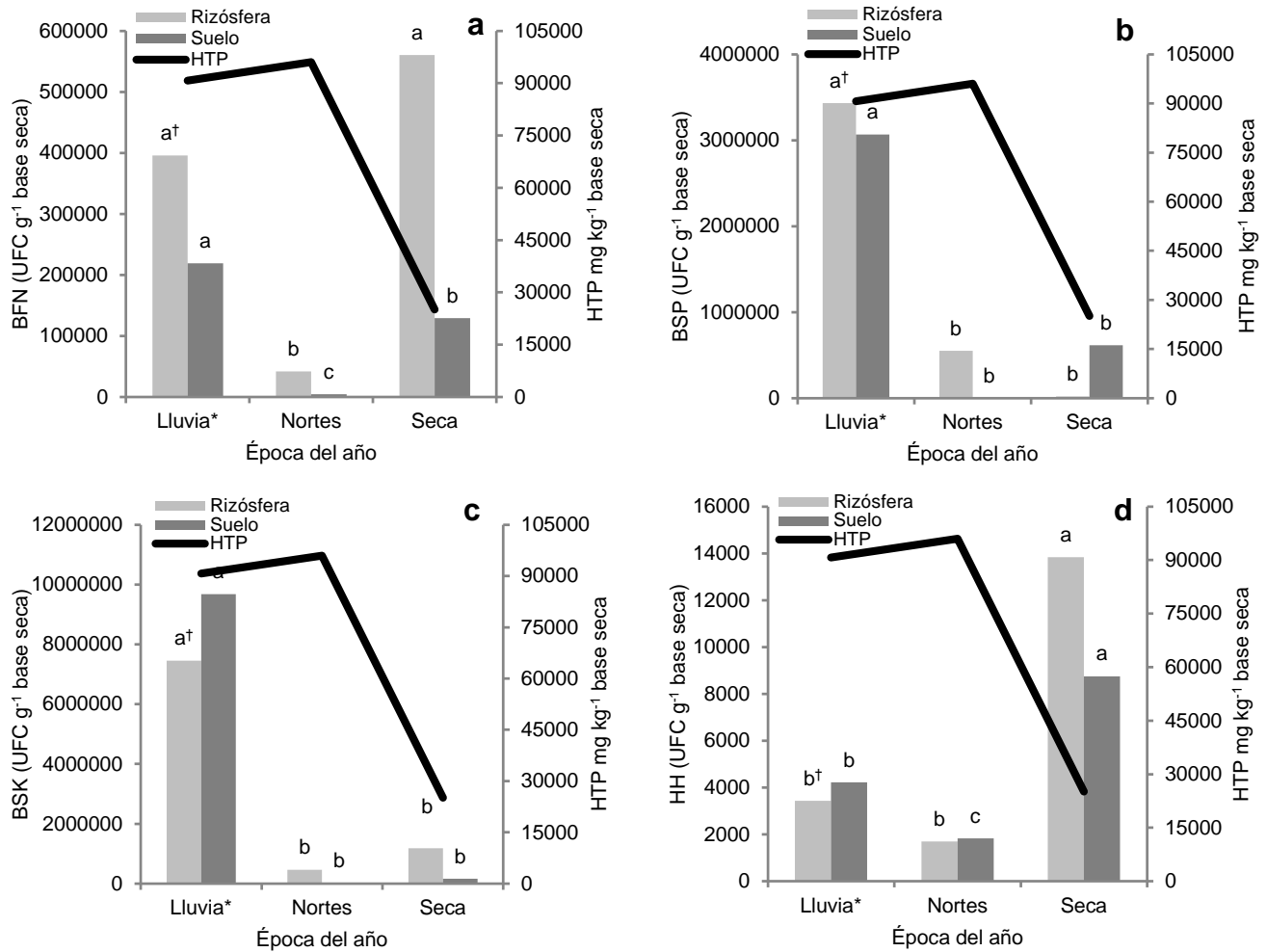


Figura 27. Efecto de los HTP sobre las poblaciones de: a) BFN, b) BSP, c) BSK y d) HH, en suelo a distancia y suelo rizosférico para un día específico de cada época del año. († Letra diferente, indica diferencias estadísticas significativas Tukey, $p \leq 0.05$) (* Hace referencia al 30 de septiembre de 2009 (lluvias), 30 de enero del 2010 (nortes) y 30 de abril del 2010 (seca)).

En cuanto a las poblaciones de HH para el DM en época de seca, se encontró una mayor población de 87×10^2 UFC g^{-1} en suelo a distancia, mientras que en suelo rizosférico se presentó con una población de 13×10^3 UFC g^{-1} , lo anterior se asoció con el menor contenido de HTP ($25,111 \text{ mg kg}^{-1}$ base seca), respecto al DM en la época de lluvias y nortes. Sin embargo, los altos contenido de HTP ($95,993 \text{ mg kg}^{-1}$ base seca) el DM en época de nortes reflejó una disminución en la población de HH, tanto en suelo a distancia, como en suelo rizosférico, respecto al DM en época de seca.

Por otra parte, el DM en época de lluvias respecto al DM en época de nortes mostró una mejor respuesta al crecimiento de HH, tanto en suelo a distancia (42×10^2 UFC g^{-1}) como en suelo rizosférico (34×10^2 UFC g^{-1}), al asociarse con un contenido de $90,714 \text{ mg kg}^{-1}$ de HTP base seca (Figura 27d).

6.4. Correlación entre variables respuesta para un día específico en cada época del año.

Se analizaron las correlaciones de las variables pH, C org, N total, P disponible e HTP en el suelo, así como BFN, BSP, BSK y HH en suelo rizosférico para el DM en época de lluvias, nortes y seca (Cuadro 19, Cuadro 20 y Cuadro 21).

6.4.1. Época de lluvias (30 de septiembre de 2009)

Durante el DM en época de lluvias, significativamente ($p < 0.05$), se observó una correlación positiva entre el pH y el P disponible, asimismo con una correlación negativa ($p < 0.01$) entre el pH y el C org, N total, BSP y HH en suelo rizosférico. La formación de C org y N total en suelo también mostraron una correlación significativa ($p < 0.01$), en tanto, que el C org con las BSP en suelo rizosférico tuvieron una asociación significativa ($p < 0.05$) (Cuadro 19).

Cuadro 19. Correlación de variables para un día específico en época de lluvias.

	pH	C org	N	P	HTP	BFN	BSP	BSK	HH
pH	1	-0.55 [¶]	-0.52 [¶]	0.46 [†]	0.05	0.23	-0.74 [¶]	-0.33	-0.58 [¶]
C org		1	0.59 [¶]	-0.40 [†]	-0.02	-0.23	0.48 [†]	0.11	0.33
N			1	-0.36	-0.20	-0.16	0.24	-0.12	0.21
P				1	-0.21	0.62 [¶]	-0.55 [¶]	-0.16	-0.65 [¶]
HTP					1	0.03	0.01	0.24	-0.33
BFN						1	-0.21	0.08	-0.12
BSP							1	0.14	0.02
BSK								1	-0.10
HH									1

pH, potencial hidrógeno; C org, Carbono orgánico; N, Nitrógeno total; P, fósforo disponible; HTP, hidrocarburos totales del petróleo; BFN, bacterias fijadoras de nitrógeno en suelo rizosférico; BSP, bacterias solubilizadoras de fosfatos en suelo rizosférico; BSK, bacterias solubilizadoras de potasio en suelo rizosférico; HH, hongos heterótrofos en suelo rizosférico.

[†] correlación significativa ($p < 0.05$)

[¶] correlación significativa ($p < 0.01$)

El P disponible mostró altas correlaciones significativas entre las BFN del suelo rizosférico. Así como una alta correlación negativa ($p < 0.01$) del P disponible entre las BSP y HH en suelo rizosférico (Cuadro 19).

6.4.2. Época de nortes (30 de enero de 2010)

El potencial hidrógeno no mostró ninguna correlación entre variables, pero el contenido de C org con las poblaciones de BFN en suelo rizosférico presentaron una correlación significativa ($p < 0.05$). Por otra parte, el N total se correlacionó negativamente ($p < 0.05$) con el P disponible, con el contenido de HTP y HH del suelo rizosférico. Mientras que con las BSK en suelo rizosférico presentó una correlación negativa significativa ($p < 0.01$) (Cuadro 20).

Cuadro 20. Correlación de variables para un día específico en época de nortes.

	pH	C org	N	P	HTP	BFN	BSP	BSK	HH
pH	1	0.11	0.05	-0.09	-0.19	0.23	-0.35	-0.34	-0.06
C org		1	0.13	0.22	0.29	0.40 [†]	0.09	-0.29	0.36
N			1	-0.41 [†]	-0.40 [†]	-0.35	0.28	-0.51 [¶]	-0.41 [†]
P				1	-0.03	-0.03	-0.44 [†]	0.46 [†]	0.91 [¶]
HTP					1	0.83 [¶]	-0.01	0.43	-0.13
BFN						1	-0.14	0.27	-0.09
BSP							1	-0.25	-0.18
BSK								1	0.26
HH									1

pH, potencial hidrógeno; C org, Carbono orgánico; N, Nitrógeno total; P, Fósforo disponible; HTP, Hidrocarburos Totales del Petróleo; BFN, Bacterias Fijadoras de Nitrógeno en suelo rizosférico; BSP, Bacterias Solubilizadoras de Fosfatos en suelo rizosférico; BSK, Bacterias Solubilizadoras de Potasio en suelo rizosférico; HH, Hongos Heterótrofos en suelo rizosférico.

[†] correlación significativa ($p < 0.05$)

[¶] correlación significativa ($p < 0.01$)

El P disponible tuvo una correlación significativa con las BSK y los HH, ambos en el suelo rizosférico, con un efecto significativo ($p < 0.05$) y ($p < 0.01$), respectivamente. Así como una correlación negativa ($p < 0.05$) del P disponible y las BSP del suelo rizosférico. En tanto que los HTP y las BFN en suelo rizosférico mostraron una correlación significativa ($p < 0.01$) (Cuadro 20).

6.4.3. Época de seca (30 de abril de 2010)

El DM en época de seca mostró una correlación significativa ($p < 0.01$) del pH con las BSK en suelo rizosférico. Pero el C org evidenció correlaciones significativas ($p < 0.01$) con el N total, el P disponible y con los contenidos de HTP. En forma similar, el N total se correlacionó significativamente ($p < 0.01$) con los contenidos de P disponible e HTP (Cuadro 21).

Cuadro 21. Correlación de variables para un día específico en época de seca.

	pH	C org	N	P	HTP	BFN	BSP	BSK	HH
pH	1	0.16	-0.19	0.01	-0.04	0.19	0.13	0.63 [¶]	-0.20
C org		1	0.78 [¶]	0.50 [¶]	0.66 [¶]	-0.28	-0.06	-0.18	0.17
N			1	0.68 [¶]	0.74 [¶]	-0.28	-0.15	-0.56 [¶]	-0.02
P				1	0.87 [¶]	-0.01	-0.02	-0.21	-0.21
HTP					1	-0.28	-0.21	-0.27	-0.23
BFN						1	0.66 [¶]	0.34 [†]	-0.08
BSP							1	-0.14	-0.14
BSK								1	-0.11
HH									1

pH, potencial hidrógeno; C org, Carbono orgánico; N, Nitrógeno total; P, Fósforo disponible; HTP, Hidrocarburos Totales del Petróleo; BFN, Bacterias Fijadoras de Nitrógeno en suelo rizosférico; BSP, Bacterias Solubilizadoras de Fosfatos en suelo rizosférico; BSK, Bacterias Solubilizadoras de Potasio en suelo rizosférico; HH, Hongos Heterótrofos en suelo rizosférico.

[†] correlación significativa ($p < 0.05$)

[¶] correlación significativa ($p < 0.01$)

El fósforo disponible, significativamente ($p < 0.01$) presentó correlación con el contenido de HTP. En cambio, las BFN en suelo rizosférico se correlacionaron significativamente ($p < 0.01$) con las BSP del suelo rizosférico, así como también se encontró un efecto significativo ($p < 0.05$) con las BSK rizosféricas (Cuadro 21).

SECCIÓN VII. CONCLUSIONES

1. El objetivo uno para el contenido de HTP se cumplió en su totalidad, de igual manera la hipótesis uno se aceptó, ya que se encontró que los hidrocarburos del petróleo fueron menores para todos los puntos el día de muestreo en época de seca, respecto al día de muestreo en época de lluvias y nortes. Se corroboró que para los tres muestreos, los hidrocarburos rebasan los límites máximos permisibles para la fracción mediana ($1,200 \text{ mg kg}^{-1} \text{ s.s.}$) y pesada ($3,000 \text{ mg kg}^{-1} \text{ s.s.}$) para suelo de uso agrícola indicado en la NOM-138-SEMARNAT/SS-2003, lo que indica la necesidad de restaurar el suelo, debido al potencial tóxico y cancerígeno de los hidrocarburos para los seres vivos que habitan el ecosistema. En cambio, en la época de nortes, la acumulación de precipitación de 2,078.2 mm, indujo una lámina de agua de 200 cm sobre la superficie, lo cual se asoció con el mayor contenido de HTP ($95,993 \text{ mg kg}^{-1} \text{ s.s.}$) para el total del área evaluada, derivado de la presa de quema y por el movimiento del agua depositada por las lluvias.
2. En base al objetivo particular uno que se cumplió en su totalidad y a la aceptación de la hipótesis uno, se encontró que las partículas (arena, limo y arcilla) que forman la textura del suelo por punto de muestreo mostraron un efecto mínimo por la presencia de HTP en contenidos de hasta $147,940 \text{ mg kg}^{-1} \text{ s.s.}$, para el día de muestreo en época de lluvias; $212,174 \text{ mg kg}^{-1} \text{ s.s.}$, para el día de muestreo en época de nortes y $112,299 \text{ mg kg}^{-1} \text{ s.s.}$, para el día de muestreo en época de seca. Sin embargo el factor que más impactó sobre las partículas del suelo, principalmente en la adición de partícula gruesa (arena) y disminución de partículas de arcilla, fue la acumulación de precipitación (2,078.2 mm) en la época de nortes, lo provocó un ascenso en la lámina de agua hasta una altura de 200 cm. Mientras que el día del muestreo en época de seca, las partículas de arena presentaron una tendencia a disminuir.

3. El objetivo uno referente al pH fue totalmente cubierto y se aceptó la hipótesis uno, ya que el P3, P5, P6, P7, P8 y P9 para el día del muestreo en época de nortes resultó ser mayor que el día del muestreo para la época de seca, aunque el suelo se clasificó como un pH fuertemente ácido.
4. El objetivo dos se cumplió en su totalidad para el contenido de C org, N total y P disponible. La hipótesis dos, para el contenido de C org se aceptó solo para el P6 y P8, siendo menores el día de muestreo en época de seca, mientras que para el día de muestreo en época de nortes se rechazó la hipótesis dos, debido a que los demás puntos restantes (P1, P2, P3, P4, P5, P7 y P9) mostraron los menores contenidos de C org. Se encontró una inhibición del contenido de C org (10.33 mg kg^{-1} base seca) el día del muestreo en época de seca en el total del área evaluada, la cual se asoció con la presencia de $95,993 \text{ mg kg}^{-1}$ de HTP.
5. La hipótesis dos para el contenido de N total se acepta para el P2, P3 y P4 el día de muestreo en época de seca, así como para el día de muestreo en época de lluvias y nortes, debido a que los contenidos de N total son muy altos para los puntos de muestreo restantes (P1, P5, P6, P7, P8 y P9). Se observó que una acumulación de precipitación en época de nortes de $2.078.2 \text{ mm}$, afectó negativamente al contenido de N total (0.19%) en el total del área evaluada. de igual manera, el contenido de HTP ($95,993 \text{ mg kg}^{-1}$ s.s.), mostró una inhibición del N total para la época de nortes.

6. Para el P disponible, la hipótesis dos se acepta, debido a que el día de muestreo en época de seca el contenido de P disponible fue menor en el P1, P2, P3, P4, P8 y P9, clasificándose como clase baja y media, de acuerdo a la clasificación descrita en la NOM-021-RECNAT-2000. Asimismo, en el total del área evaluada para la época de nortes la acumulación de precipitación de 2,078.2 mm, se asoció con el mayor contenido con 24.73 mg kg^{-1} s.s., así como la presencia de $95,993 \text{ mg kg}^{-1}$ s.s. de HTP.
7. El objetivo dos para la diversidad, cobertura y biomasa aérea vegetal se cubrió en forma total, mientras que la hipótesis dos para la diversidad y biomasa aérea vegetal se acepta para el día de muestreo en época de nortes, debido a que se observó una menor diversidad de especies y en consecuencia una menor producción de biomasa aérea, pero se rechaza para el día de muestreo en época de lluvias, ya que existe un mayor número de especies vegetales y producción de biomasa aérea. Se observó que en la época de nortes la presencia de una acumulación de precipitación de 2,078.2 mm, y un contenido de $95,993 \text{ mg kg}^{-1}$ s.s. de HTP, presentó una inhibición en el número de especies vegetales (6), así como en la producción de biomasa aérea con 567 g, en el total del área evaluada.
8. La hipótesis dos para la cobertura vegetal se rechaza, debido a que el día de muestreo en época de lluvias y nortes, la cobertura fue mayor (100 %) en especies vegetales como el pasto alemán y el pasto japonesa para el día de muestreo en época de lluvias, así como la hoja de laguna, el tule, el pasto de hoja ancha y el zacatillo el día de muestreo en época de nortes, mientras que el día de muestreo en época de seca, la cobertura fue más heterogénea entre especies vegetales.

9. El objetivo tres se cumplió satisfactoriamente y hace referencia a la macrofauna del suelo, donde la hipótesis tres se acepta, debido a que la abundancia fue menor el día de muestreo en época de lluvias y nortes que el día de muestreo en época de seca se presentó una abundancia de 98 individuos m^{-2} , la cual se asoció con una acumulación de precipitación de 51.2 mm en época de seca.
10. El objetivo cuatro se cubrió en su totalidad para las poblaciones de BFN, BSP, BSK y HH para el suelo a distancia y suelo rizosférico. En base a lo anterior, la hipótesis cuatro se acepta, debido a que el día de muestreo en época de lluvias las poblaciones de BFN, BSP y BSK presentaron una mayor densidad en todos los puntos de muestreo, comparados con los encontrados el día del muestreo en época de nortes y secas, mientras que los HH presentaron mayores poblaciones en el P8 y P9 para el día del muestreo de las tres épocas del año.
11. El día de muestreo en época de lluvias, se encontró que la mejor especie vegetal promotora del crecimiento de BFN en suelo a distancia fue el pasto arrocillo, pero en suelo rizosférico se encontró a la especie vegetal camalote y tulillo. En cuanto a las especies vegetales que hospedan una mayor población de BSP, encontrándose en suelo a distancia a la especie tule y en suelo rizosférico al pasto egipto, así como el cebollín y el pasto salisaca para el suelo a distancia y suelo rizosférico se asociaron con una mejor población de BSK, pero la mejor población de los HH se encontró en el pasto salisaca y cebollín en suelo a distancia y suelo rizosférico.
12. El día de muestreo en época de nortes demostró que la mejor población de BFN se asoció con la especie vegetal hoja de laguna y zacatillo, mientras que el pasto japonesa y el tule relacionó con la población de BSP. Por otra parte, las BSK incrementaron su población en la especie hoja de laguna y pasto de hoja ancha, pero en los HH el zacatillo demostró ser la especie donde más poblaciones se encontraron.

13. De igual manera, para el día de muestreo en época de seca, la flor morada y el camalote evidenciaron la mejor formación de BFN, en cambio, las mayores poblaciones de BSP se encontraron en la especie vegetal flor morada y pasto japonesa, al igual que el camalote fue la especie que más promovió las poblaciones de BSK, mientras que los HH se asociaron con la especie camalote y pasto alfombra.
14. Las especies vegetales asociadas con las poblaciones de BFN, BSP, BSK y HH descritas anteriormente presentan un proceso de adaptación a las condiciones cambiantes del sitio de estudio, principalmente de factores ambientales como la acumulación de precipitación y de factores antropogénicos como la contaminación por HTP. Sin embargo, las especies vegetales encontradas en este estudio se encuentran representadas por la familia de las gramíneas, las cuales constituyen un nuevo panorama de investigación para estudios de fitorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos del petróleo en sitios anegados.
15. Las plantas y organismos del suelo resultaron ser buenos indicadores de la presencia de hidrocarburos del petróleo y acumulación de precipitación para un día específico de muestreo por época del año. En plantas se encontró que la producción de biomasa y diversidad vegetal son buenas indicadoras del factor climático, específicamente en acumulación de precipitación, debido a que presentan una relación inversamente proporcional. En cuanto a los organismos del suelo, se localizó que la macrofauna y la población de hongos heterótrofos se pueden como indicadores de la alteración del suelo, por factores climáticos y antropogénicos, pero específicamente las poblaciones de BFN, BSP y BSK evidenciaron su sensibilidad ante el aumento en el contenido de hidrocarburos totales del petróleo y acumulación de precipitación.

SECCIÓN VIII. LITERATURA CITADA

- Adams R.H., Domínguez R.V.I. y García H.L. 1999. Potencial de la biorremediación de suelo y agua impactados por petróleo en el trópico mexicano. *Terra Latinoam.* 17(2) 159-174.
- Adams R.H., Zavala-Cruz J. y Morales-García F. 2008. Concentración residual de hidrocarburos en suelo del trópico. II: Afectación a la fertilidad y su recuperación. *Interciencia.* 33(7) 483-489.
- Adl S.M. 2003. *The Ecology of Soil Decomposition.* Ed. CABI Publishing. Cambridge, USA. 335 p.
- Alejo P.D.E. 2006. Toxicidad del petróleo crudo en plántula y planta de rábano (*Raphanus Sativus* L.). Tesis de Ingeniero Agrónomo. Universidad Popular de la Chontalpa. H. Cárdenas, Tabasco. 60 p.
- Álvarez S, J.D. y R. Ferrera-Cerrato. 1994. Los microorganismos del suelo en la estructura y función de los agroecosistemas. Cuaderno de Edafología 25. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. pp. 24-31.
- Álvarez-Sánchez J. y Naranjo-García E. 2003. *Ecología del Suelo en la Selva Tropical Húmeda de México.* 1ª. Edición. Ed. Instituto de Ecología A.C. y Facultad de Ciencias, UNAM. Xalapa, Veracruz. 302 p.
- Anaya L.A.L. 2003. *Ecología Química.* 1a. Edición. Ed. Plaza y Valdés. México, D.F. 349 p.
- Anderson M.J. and Ingram I.J.S. 1993. *Tropical Soil Biology and Fertility: a Handbook of Methods.* 2a. Edición. CAB International. Wallingford, UK. 221 p.
- Andrade M.I., Covelo E.F., Vega F.A. y Marcet P. 2004. Effect of the *Prestige* Oil Spill on Salt Marsh Soils on the Coast of Galicia (Northwestern Spain). *J. Environ. Qual.* 33, 2103-2110.
- Anónimo. 2007. Los impactos de la explotación petrolera en ecosistemas tropicales y la biodiversidad. Elizabeth Bravo. Acción ecológica. 61 pp.
- Anónimo. 2009. Red Nacional de Estaciones Agroclimáticas. <http://clima.inifap.gob.mx/redclima/>

- Anónimo. 2009a. Análisis nacional de emergencias ambientales. PROFEPA. <http://www.profepa.gob.mx/> 1p.
- Anónimo. 2009b. Propuesta de extrapolación de una experiencia de restauración de humedales. Proyecto FH001 CONABIO-INECOL. 60 pp.
- Arias J.A.C. 2007. Suelos Tropicales. 1ª Edición. Ed. EUNED. San José, Costa Rica. 169 p.
- Arias T.A. 2008. Evaluación toxicológica de suelos afectados por petróleo a partir de plantas y plántulas de frijol negro (*Phaseolus Vulgaris* L.). Tesis de Ingeniero Químico Petrolero. Universidad Popular de la Chontalpa. H. Cárdenas, Tabasco. 68 p.
- Arias A.H., Marcovecchio J.E., Freije R.H., Ponce-Velez G., Vázquez-Botello A. 2010. Análisis de fuentes y toxicidad equivalente de sedimentos contaminados con PAHs en el estuario de Bahía Blanca, Argentina. *Hidrobiológica*. 20(1) 41-56.
- Atlas R.M. y Bartha R. 2002. Ecología Microbiana y Microbiología Ambiental. 1ª Edición. Ed. Pearson Educación, S.A. Madrid España. 677 p.
- Barioglio C.F. 2006. Diccionario de las Ciencias Agropecuarias. Ed. Brujas. 1ª Edición. Córdoba, Argentina. 495 p.
- Barragán V.A., Aveiga I., Trueba G. 2008. Microbial community composition in petroleum contaminated and uncontaminated soil from Francisco de Orellana, in the northern Ecuadorian Amazon. *International Microbiology*. 11, 121-126.
- Basaéz R.L. 2009. ¿Qué es el pH?: formas de medirlo. *Ciencia Ahora*. 23(12) 59-62.
- Basak B.B. y Biswas D.R. 2008. Influence of potassium solubilizing microorganism (*Bacillus mucilaginosus*) and waste mica on potassium uptake dynamics by sudan grass (*Sorghum vulgare* Pers.) grown under two Alfisols. *Plant and Soil*. 317(2) 235-255.
- Begón M., Townsed C.R. y Harper J.L. 2006. Ecology: From Individuals to Ecosystem. Ed. Wiley-Blackwell. 4ª Edición. Australia. 738 p.

- Behari J. 2001. *Physical Methods of Soil Characterization*. Ed. Narosa Publishing House. New Delhi. 212 p.
- Beltrán-Paz O.I. 2006. *Caracterización de suelos contaminados por hidrocarburos y su impacto en las raíces de la vegetación del CPG "La Venta" Tabasco, México*. Tesis de Licenciatura en Biología. UAM, Unidad Xochimilco, División de Ciencias Biológicas y de la Salud. 84 p.
- Bennett S.J. y Simon A. 2004. *Riparian Vegetation and Fluvial Geomorphology*. Ed. American Geophysical Union. Washington, DC. 282 p.
- Borror D.J. y White R.E. 1970. *A Field Guide to the Insects of America North of México*. Ed. Houghton Mifflin. United States of América. 404 p.
- Botello A.V., Von Osten J.R., Gold-Bouchot G y Agraz-Hernández C. 2005. *Golfo de México: Contaminación e Impacto Ambiental: Diagnóstico y Tendencias*. 2ª. Edición. México, D.F. 695 p.
- Brandt R., Merkl N., Schultze-Kraft R., Infante C., Broll G. 2006. Potential of vetiver (*vetiveria zizanioides* (L) Nash) for phytoremediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soils in Venezuela. *Int. J. Phytoremediation*. 8(4) 273-284.
- Brown G.G., Fragoso C., Barois I., Rojas P., Patrón J.C., Bueno J., Moreno A.G. Lavelle P., Ordaz V. y Rodríguez C. 2001. Diversidad y rol de la macrofauna edáfica en los ecosistemas tropicales mexicanos. *Acta Zoológica Mexicana*. Es1. 79-110.
- Brzezinska M.S., Lalke-Poorczyk E., Donderski W. 2008. Shrimp waste as a respiration substrate for soil microflora of the chelmzynskie lake wastershed. *Polish Journal of Natural Sciences*. 23(1) 164-177.
- Buscot F. y Varma A. 2005. *Microorganisms in Soils: Roles in Genesis and Functions*. Ed. Springer. Heidelberg, Germany. 419 p.
- Calva-Benítez L.G., Pérez-Rojas .A. y Márquez-García A.Z. 2006. Contenido de carbono orgánico y características texturales de los sedimentos del sistema costero lagunar Chantuto-Panzacola, Chiapas. *Hidrobiología*. 16(2) 127-136.

- Campos P. 2003. *Biología Uno*. Ed. Limusa. 1ª Edición. México, D.F. 200 p.
- Caravaca F. y Roldán A. 2003. Assessing changes in physical and biological properties in a soil contaminated by oil sludges under semiarid Mediterranean conditions. *Geoderma*. 117, 53-61.
- Carneiro S.P., Silva S.J., Romilson P.M.J., Vital S.R. y Rocha A.A. 2008. Comunidade microbiana e mesofauna edáficas em solo sob caatinga no semi-árido da Paraíba. *R. Bras. Ci. Solo*. 32(32) 151-160.
- Casanova E. 2005. *Introducción a la Ciencia del Suelo*. 2ª Edición. Ed. Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela. 487 p.
- Celis H.J. 2009a. Efectos de los derrames de petróleo sobre los hábitats marinos. *Ciencia Ahora*. 24(12) 22-30.
- Chediack S.E. 2009. Conceptos generales sobre biodiversidad y manejo de recursos naturales. En: Chediack S.E (Ed.). *Monitoreo de Biodiversidad y Recursos Naturales: ¿Para qué?*. Corredor Biológico Mesoamericano. Serie Diálogo/ número 3. Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la Biodiversidad. SEMARNAT. México D.F. 14-29 pp.
- Consuegra G.R.C. 2006. NMX-AA-134-SCFI-2006. Suelos – hidrocarburos fracción pesada por extracción y gravimetría – método de prueba. Dirección de normalización. SEMARNAT – México. 23 pp.
- Dajoz R. y Leiva M.M.J. 2003. *Tratado de Ecología*. Ed. Mundi-Prensa. 2ª. Edición. Madrid, España. 600 p.
- Daubenmire R. 1959. A Canopy-Coverage Method of Vegetational Analysis. *Northwest Science*. 33(1) 43-64.
- De Dios V.O.O. 2001. *Ecofisiología de los Bovinos en Sistemas de Producción del Trópico Húmedo*. Colección José N. Rovirosa: Biodiversidad, Desarrollo Sustentable y Trópico Húmedo. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT). 376 p.
- De la Cruz M.M.G. 2008. *Evaluación de la restauración comercial de suelos contaminados con petróleo mediante bioensayos con planta de rábano (*Raphanus Sativus* L.)*. Tesis de Ingeniero Químico Petrolero. Universidad Popular de la Chontalpa. H. Cárdenas, Tabasco. 79 p.

- Díaz R.R. 2001. Siembra Directa en el Cono Sur. Ed. IICA-PROCISUR. Montevideo, Uruguay. 450 p.
- DOF (Diario Oficial de la Federación). 2002. NOM-021-RECNAT-2000. Establece las Especificaciones de Fertilidad, Salinidad y Clasificación de Suelos, Estudio, Muestreo y Análisis. Diario oficial de la Federación. Miércoles 23 de abril del 2003. 85 p.
- DOF (Diario Oficial de la Federación). 2005. NOM-138-SEMARNAT/SS-2003. Límites Máximos Permisibles de Hidrocarburos en Suelos y las Especificaciones para su Caracterización y Remediación. Diario Oficial de la Federación. Miércoles 29 de marzo del 2005. 25 p.
- Dorantes A.R. 2008. Fitorremediación de suelos contaminados con diferentes tipos de petróleo crudos mediante el pasto azul (*Echinochloa* sp). Tesis de Ingeniero Químico Petrolero. Universidad Popular de la Chontalpa. H. Cárdenas, Tab. 77 p.
- Ehlers W. y Goss M.J. 2003. Water Dynamics in Plant Production. Ed. CAB International. Wallingford, UK. 273 p.
- EPA (Environment Protection Agency). 1996. Method 3540C Mod. Soxhlet Extraction. . Washington, DC. USA. 8 p.
- Escalante-Espinosa E., Gallegos-Martínez M.E., Favela-Torres E., Gutiérrez-Rojas M. 2005. Improvement of the hydrocarbon phytoremediation rate by *Cyperus laxus* Lam. Inoculated with a microbial consortium in a model system. *Chemosphere*. 59, 405-413.
- Escamilla B.J.A., Quinta F., Medina L.F., Guzmán A., Pérez E. y Calvo I.L.M. 2005. Relaciones suelo-planta en ecosistemas naturales de la Península de Yucatán: Comunidades dominadas por palmas. 159-172 pp. En: Bautista Z.F. y Palacio A.G. (Eds). Caracterización y Manejo de los Suelos de la Península de Yucatán: Implicaciones Agropecuarias, Forestales y Ambientales. Universidad Autónoma de Campeche. Universidad Autónoma de Yucatán. 181 p.

- Estrada A.J. 2002. Pastos y Forrajes para el Trópico Colombiano. Ed. Universidad de Caldas. 511 p.
- FAO (Food and Agriculture Organization). 2000. Manual de Prácticas Integradas de Manejo y Conservación de Suelos. Boletín de Tierras y Aguas de la FAO. Roma. 220 p.
- Fernández R., Galarraga F., Benzo Z. 2002. Preliminary study on some contaminant hydrocarbons in settled particles in Caracas city, Venezuela. Environ. Contam. Toxicol. 68, 525-531.
- Fernández A.R. y Leiva M.M.J. 2003. Ecología para la Agricultura. Ed. Mundi-Prensa. Madrid, España. 223 p.
- Fernández L.L.C., Rojas A.N.G., Roldán C.T.G., Ramírez I.M.E., Zegarra M.H.G., Uribe H.R., Reyes A.R.J., Flores H.D. y Arce O.J.M. 2006. Manual de técnicas de análisis de suelos aplicadas a la remediación de sitios contaminados. Instituto Mexicano del Petróleo. 1a. Edición. México, D.F. 180 p.
- Fine P., Graber E.R. y Yaron B. 1997. Soil interactions with petroleum hydrocarbons: Abiotic processes. Soil Technology. 10, 133-153.
- Font T.I. 2000. Climatología de España y Portugal. Ed. Universidad de Salamanca. 2ª Edición. España. 422 p.
- Fuentes Y.J.L. 2001. Iniciación a la Botánica. Ed. Mundi-Prensa. 1ª Edición. Madrid, España. 230 p.
- Fuentes C.R. 2007. Agrosistemas Sostenibles y Ecológicos: La Reconversión Agropecuaria. Ed. Universidad Santiago de Compostela. España. 250 p.
- Furher J. 2003. Agroecosystem responses to combinations of elevated CO₂, ozone, and global climate change. Agriculture, Ecosystems and Environment. 97, 1-20.
- García E. 1988. Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen. (Para Adaptarlos a las Condiciones de la República Mexicana). Ed. Talleres Larios México. 4ª Edición. México, D.F. 90 p.

- García G.E. 1999. La rizósfera de diferentes gramíneas en la degradación de un complejo de hidrocarburos. Tesis de maestría en ciencias. Instituto de Recursos Naturales. Especialidad en Edafología. Colegio de Postgraduados Campus Montecillos. Montecillos, Texcoco, Estado de México. 91 pp.
- García C., Hernández T., Roldan A., Albaladejo J. y Castillo V. 2000. Organic amendment and mycorrhizal inoculation as a predice in afforestation of soils with *Pinus halepensis* Miler effect on their microbial activity. Soil. Biol. Biochem. 32(9) 1173-1181.
- García-López E., Zavala-Cruz J. y Palma-López D.J. 2006. Caracterización de las comunidades vegetales en un área afectada por derrames de hidrocarburos. Terra Latinoam. 24(1) 17-26.
- Gliessman S.R. 2002. Agroecología: Procesos Ecológicos en Agricultura Sostenible. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Publicado por CATIE. Costa Rica. 358 p.
- Gobat J.M., Arango M. y Matthey W. 2004. The Living Soil. Ed. Science Publishers, Inc. NH, USA. 602 p.
- Gómez O.D. 2004. Recuperación de Espacios Degradados. Ed. Mundi-prensa, Madrid, España. 583 p.
- González-Pérez J.A., González-Villa F.J., Almendros G. y Knicker H. 2004. The effect of fire on soil organic matter – A review. Environment International. 30, 855-870.
- Guang-Can T., Shu-Jun T., Miao-Ying C., Guang-Hui X. 2008. Phosphate-solubilizing and mineralizing abilities of bacteria isolate from soils. Pedosphere. 18(4) 515-523.
- Gunderson J.J., Knight J.D. y Van Rees K.C.J. 2008. Relating hybrid poplar fine root production, soil nutrients, and hydrocarbon contamination. Biorremediation Journal. 12(3) 156-167.
- Gutiérrez M.C., Zavala C.J. 2001. Rasgos hidromorficos de suelos tropicales contaminados con hidrocarburos. Terra Latinoamericana. 20, 101-111.

- Harpstead M.I., Sauer T.J. y Bennet W.F. 2001. Soil Science Simplified. Ed. Wiley-Blackwell. 4ª Edition. United States of America. 225 p.
- Heras J., Fabeiro C. y Meco R. 2003. Fundamentos de Agricultura Ecológica: Realidad Actual y Perspectivas. Ed. Universidad de Castilla – La Mancha. 1ª Edición. España. 374 p.
- Hernández A.E., Ferrera-Cerrato R. y Rodríguez V.R. 2003. Bacterias de vida libre fijadoras de nitrógeno atmosférico en rizósfera de frijol contaminada con queroseno. Terra Latinoamericana. 21(1) 81-89.
- Hernández-Acosta E., Gutiérrez-Castorena M.C., Rubiños-Panta J.E. y Alvarado-López J. 2006. Caracterización del suelo y plantas de un sitio contaminado con hidrocarburos. Terra Latinoamericana. 24(4) 463-470.
- Hou F.S.L., Leung D.W.M., Milke M.W. y Macpherson D.J. 1999. Improvement in ryegrass seed germination for diesel contaminated soils by peg treatment technology. Environmental Technology. 20(4) 413-418.
- Huetz L.A. 2005. La Vegetación de la Tierra. Ed. AKAL. Sevilla, España. 263 p.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2008. Capítulo Geográfico del Anuario Estadístico de Tabasco. Edición 2008. 29 p.
- Iturbe R., Fores R.M., Flores C.R., Torres L.G. 2004. TPH- contaminated Mexican refinery soil: health risk assessment and the first year of changes. Environmental Monitoring and Assessment. 91, 237-255.
- Johnson L.F., Curl E.A. 1972. Methods for Research on the Ecology of Soil-Borne Plant Pathogens. Burgess Publishing Company. Minneapolis, MIN, USA. 147 p.
- Kass D.C.L. 1996. Fertilidad de Suelos. Ed. EUNED. San José Costa Rica. 272 p.
- Kirkpatrick W.D., White P.M., Wolf D.C., Thoma G.J. y Reynolds C.M. 2008. Petroleum – degrading microbial numbers in rhizosphere and non – rhizosphere crude oil contaminated soil. International Journal of Phytoremediation. 10, 210-221.
- Lal R. 2003. Métodos y Normas para Evaluar el Uso Sostenible de los Recursos Suelo y Agua en el trópico. 1a. Edición. Ed. Produmedios. Bogotá, Colombia. 55 p.

- Lavelle P. y Spain A.V. 2003. Soil Ecology. Ed. Kluwer Academic Publishers. New York, USA. 654 p.
- Lin Q.M., Rao Z.H., Sun Y.X., Yao J., Xing L.J. 2002. Identification and practical application of silicate-dissolving bacteria. Agric. Sci. China. (1) 81–85.
- Liste H.H. y Felgentreu D. 2006. Crop growth, culturable bacteria, and degradation of petrol hydrocarbons (PHCs) in a long-term contaminated field soil. Applied Soil Ecology. 31, 46-52.
- López A.I. 2006. Ecología. Ed. Umbral, S.A. de C.V. 1a Edición. Jalisco, México. 133 p.
- López C.M.E. 2010. Diversidad y densidad de la microflora en suelo restaurado por derrame de petróleo en Cunduacán, Tabasco. Tesis de Licenciado en Químico Fármaco Biólogo. Universidad Popular de la Chontalpa. H. Cárdenas, Tabasco. 77 p.
- MacAdam J.W. 2009. Structure and Functions of Plants. Ed. John Wiley and Sons. 304 p.
- Madigan M.T., Martinko J.M. y Parker J. 2004. Brock. Biología de los Microorganismos. 10a. Ed. Rev. Pearson Educación, S.A. Madrid, España. 1011 p.
- Malagón M. R. y Prager M.M. 2001. El Enfoque de Sistemas: Una Opción para el Análisis de las Unidades de Producción Agrícola. Ed. Universidad Nacional de Colombia. Colombia. 193 p.
- Marín G.M.L., Aragón R.P. y Gómez B.C. 2002. Análisis Químico de Suelos y Agua: Manual de Laboratorio. Ed. Universidad Politécnica de Valencia. España. 168 p.
- Martínez, C.R. 2004. Manejo agroecológico del agroecosistema. En: IV Encuentro Nacional de Agricultores Experimentadores e Investigadores en Producción Orgánica. Turrialba, Costa Rica. 5-14 p.
- Martínez H.E., Fuentes J.P. y Acevedo H.E. 2008. Carbono orgánico y propiedades del suelo. R.C. Suelo Nutr. Veg. 8(1) 68-96.

- Martínez V.E. y López S.F. 2001. Efecto de hidrocarburos en las propiedades físicas y químicas de suelo arcilloso. *Terra Latinoamericana*. 19(001) 9-17.
- Melero S., Madejón E., Ruiz J.C. y Herencia J.F. 2007. Chemical and biochemical properties of a clay soil under dryland agriculture system as affected by organic fertilization. *Europ. J. Agronomy*. 26, 327-334.
- Menghi M., Herrera M. 1998. Modelo de estados y transiciones para pastizales del valle de inundación del río dulce (depresión de mar chiquita, Córdoba, Argentina). *Ecotropicos*. 11(2) 131-140.
- Minke G. 2006. *Building with Earth: Design and Technology of a Sustainable Architecture*. Ed. Birkhäuser. United States of America. 199 p.
- Miranda D. y Restrepo R. 2005. Los Derrames de Petróleo en Ecosistemas Tropicales – Impactos, Consecuencias y Prevención. La Experiencia de Colombia. *International Oil Spill Conference*. 5 p.
- Mohn W.W. y Stewart G.R. 2000. Limiting factors for hydrocarbon biodegradation at low temperature in Arctic soils. *Soil biology and Biochemistry*. 32, 1161-1172.
- Morales G.G. 2007. La fitorremediación de suelos contaminados con petróleo mediante la utilización de la planta de arroz (*Oriza sativa* L). Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados *Campus* Tabasco. H. Cárdenas, Tabasco. 71 p.
- Moreno C.E. 2001. Métodos para Medir la Biodiversidad. *M&T-Manuales y Tesis SEA*. Vol. 1. Zaragoza, España. 83 p.
- Moreno C.E., Guerrero P.A., Gutiérrez C.M.C., Ortiz S.C.A., Palma L.D.J. 2002. Los manglares de Tabasco, una reserva natural de carbono. *Madera y Bosques*. 8(1) 115-128.
- Morera J.A. 2000. Agricultura, recursos naturales, medio ambiente y desarrollo sostenible en Costa Rica. *Agronomía Mesoamericana*. 11(1) 179-185.

- Mujica B.C.F., Méndez N.J.R. y Pino M.F.B. 2006. Crecimiento de plántulas de frijol (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) en dos suelos contaminados con petróleo. *ESPOL*. 19(1) 17-24.
- Mukerji K.G., Manoharachary C. y Singh J. 2006. *Microbial Activity in the Rhizosphere*. Ed. Gulf Professional Publishing. Leipzig, Germany. 349 p.
- Navarro B.S. y Navarro G.G. 2003. *Química Agrícola: El suelo y los Elementos Químicos Esenciales para la Vida Vegetal*. 2a. Edición. Ed. Mundi-Prensa. México D.F. 487 p.
- Nelson D.W. and Sommers L.E. 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: Page A.L. *Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties*. 2a. Edición. Ed. ASA SSSA. Madison, WI. USA. 539-579 pp.
- Nelson D.W. and Sommers L.E. 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: Page A.L. *Methods of Soil Analysis. Part 2*. 2ª. Edición. Ed. Agronomy. Am.Soc. of Agron. Inc. Madison, WI. 961-1010 pp.
- Nicholls C. y Altieri M. 2002. Biodiversidad y diseño agroecológico: un estudio de caso de manejo de plagas en viñedos. *Manejo Integrado de Plagas y Agroecología*. 65, 50-64.
- Njoku K.L., Akinola M.O. y Taiwo B.G. 2009. Effect of gasolina diesel fuel mixture on the germination and the growth of *Vigna unguiculata* (Cowpea). *Africam Journal of Environmental Science and Technology*. 3(12) 466-471.
- Obayori O.S., Llori M.O., Adebusoye S.A., Amund O.O., Oyetibo G.O. 2008. Microbial population changes in tropical agricultural soil experimentally contaminated with crude petroleum. *African Journal of Biotechnology*. 7(24) 4512-4520.
- Obire O. y Anyanwu E.C. 2009. Impact of various concentrations of crude oil on fungal populations of soil. *Int. J. Environ. Sci. Tech*. 6(2) 211-218.
- Odum E.P. y Barrett G.W. 2006. *Fundamentos de Ecología*. 5ª. Edición. Ed. Thompson. México D.F. 598 p.

- Ogbo E.M., Zibigha M. y Odogu G. 2009. The effect of crude oil on growth of the weed (*Paspalum scrobiculatum* L.) – phytoremediation potential of the plant. *African Journal of Environmental Science and Technology*. 3(9) 229-233.
- Okonokhua B.O., Ikhajagbe B., Anoliefo G.O. y Emede T.O. 2007. The effects of spent engine oil in soil properties and growth of maize (*Zea mays* L.). *J. Appl. Sci. Environ. Manage.* 11(3) 147-152.
- Olguín E.J., Hernández M.E. y Sánchez-Galván G. 2007. Contaminación de manglares por hidrocarburos y estrategias de biorremediación, fitorremediación y restauración. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 23(3) 139-154.
- Orozco H.J.A. 2009. Estudio comparativo de microorganismos solubilizadores de fósforo en suelo restaurado por derrame de petróleo en Cunduacán, Tabasco. Tesis de Licenciado en Químico Fármaco Biólogo. Universidad Popular de la Chontalpa. H. Cárdenas, Tabasco. 61 p.
- Ortíz B.O., Ize LI., Gavilán G.A. 2003. La restauración de suelos contaminados con hidrocarburos en México. *Gaceta ecológica*. 69, 83-92.
- Osuji L.C. y Nwoye I. 2007. An appraisal of the impact of petroleum hydrocarbons on soil fertility: the Owaza experience. *African Journal of Agricultural Research*. 2(7) 318-324.
- Pardo C.J.L., Perdomo R.M.C. y López J.L.B. 2004. Efecto de la adición de fertilizantes inorgánicos compuestos en la degradación de hidrocarburos en suelos contaminados con petróleo. *Nova*. 2(2) 40-49.
- PEMEX (Petróleos Mexicanos). 2009. Anuario Estadístico. Petróleos Mexicanos. México, D.F. 74 p.
- PEMEX (Petróleos Mexicanos). 2010. Anuario estadístico. Petróleos Mexicanos. México, D.F. 75 p.
- Peña-Castro J.M., Barrera-Figueroa B.E., Ruiz-Medrano R. y Xoconostle-Cázares B. 2006. Bases moleculares de la fitorremediación de hidrocarburos totales del petróleo. *Terra Latinoam.* 24(4) 529-239.

- Porta C.J., López-Acevedo R.M. y Roquero L.C. 2003. Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente. 3^a. Edición. Ed. Mundi-Prensa. México, D.F. 929 p.
- Porta C.J., López-Acevedo L. y Poch R.M. 2008. Introducción a la Edafología: Uso y Protección del Suelo para la Agricultura y el Medio Ambiente. Editorial Mundi-Prensa. México, D.F. 452 p.
- Qi-Mei L., Zheng-Hung R., Yan-Xing S., Jun Y., Li-Jun X. 2002. Identification and practical application of silicate-dissolving bacteria. *Agric. Sci. China.* 1, 81-85.
- Qu W., Xue B., Su C., Wang S. 2007. Evaluation of biogenic and anthropogenic inputs of aliphatic hydrocarbons to Lake Taihu sediments using biomarkers. *Hidrobiología.* 581, 89-95.
- Quiñones-Aguilar E.E., Ferrera-Cerrato R., Gavi-Reyes F., Fernández-Linares L., Rodríguez-Vázquez R. y Alarcón A. 2003. Emergencia y crecimiento de maíz en un suelo contaminado con petróleo crudo. *Agrociencia.* 37(6) 585-594.
- Rawia E.A., Nemat A.M. y Hamouda H.A. 2009. Evaluate effectiveness of bio and mineral fertilization on the growth parameters and marketable cut flowers of *Matthiola incana* L. *American-Eurasian J. Agric. and Environ. Sci.* 5(4) 509-518.
- Reeves G. 2000. Understanding and Monitoring Hydrocarbons in Water. Arjay Engineering Ltd. Oakville, Ontario, Canadá. 4 p.
- Rennie R.J. 1981. A single medium for the isolation of acetylene-reducing (dinitrogen-fixing) bacteria from soils. *Can. J. Microbiol.* 27, 8-14.
- Rentz J.A., Alvarez P.J.J. y Schnoor J.L. 2004. Repression of *Pseudomonas putida* phenanthrene degrading activity by plant root extracts and exudates. *Environmental Microbiology.* 6(6) 574-583.
- Rivera C.G. 2007. Conceptos Introductorios a la Fitopatología. Ed. EUNED. San José, Costa Rica. 308 p.

- Rivera-Cruz M.C., Ferrera-Cerrato R., Volke-Haller V., Fernández-Linares L. y Rodríguez-Vázquez R. 2002a. Poblaciones microbianas en perfiles de suelos afectados por hidrocarburos del petróleo en el estado de Tabasco, México. *Agrociencia*. 36(2) 149-160.
- Rivera-Cruz M.C., Ferrera-Cerrato R., Sánchez-García P., Volke-Haller V., Fernández-Linares L., Rodríguez-Vázquez R. 2004. Descontaminación de suelos con petróleo crudo mediante microorganismos autóctonos y pasto alemán [*Echinochloa polystachya* (H.B.K.) Hitchc.]. *Agrociencia*. 38, 1-12.
- Rivera-Cruz M.C. y Trujillo-Narcía A. 2004. Estudio de toxicidad vegetal en suelos contaminados con petróleos nuevo e intemperizado. *Interciencia*. 29(7) 369-376.
- Rivera-Cruz M.C., Trujillo-Narcía A., Miranda C.M.A. y Maldonado C.E. 2005. Evaluación toxicológica de suelos contaminados con petróleos nuevo e intemperizado mediante ensayos con leguminosas. *Interciencia*. 30(6) 326-331.
- Rodríguez R.E., Jiménez I.S. y Valenzuela F.M.I. 1997. Contaminación acuática generada por la producción de hidrocarburos en Tabasco, México. En: AIDIS; Colegio de Ingenieros y Agrimensores de Puerto Rico. *Preservación del Ambiente y el Control de la Contaminación: Eslabones Indispensables para el Futuro de las Américas*. San Juan, AIDIS. 1-12 pp.
- Rodríguez-Echeverría S. 2009. Organismos del suelo: la dimensión invisible de las invasiones por plantas no nativas. *Ecosistemas*. 18(2) 32-43.
- Rojas H.S., Olivares P.J., Jiménez G.R. y Hernández C.E. 2005. Manejo de praderas asociadas de gramíneas y leguminosas para pastoreo en el trópico. *Revista Electrónica de Veterinaria*. 6(5) 1-19.
- Rossi S.M.M., Rollán A.A. y Bachmeier O.A. 2006. Biodisponibilidad de fósforo en un suelo del sur de Santa Fe (Argentina). Efectos de dos fuentes fosfatadas y sus mezclas con urea. *Agriscientia*. 23(2) 91-97.

- Sánchez-Hernández C., Romero-Almaraz M.L., Colín-Martínez H. y García-Estrada C. 2001. Mamíferos de cuatro áreas con diferente grado de alteración en el sureste de México. *Acta Zool. Méx.* 84, 35-48.
- Sangabriel W., Ferrera-Cerrato R., Trejo-Aguilar D., Méndez-López M.R., Cruz-Sánchez J.S., López-Ortíz C., Delgadillo-Martínez J y 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.
- SAS (Statistical Analysis System). 2005. User's Guide, Version 9.1.3. SAS Institute, Inc. Cary, NC. 664 p.
- Schaetzl R.J. y Anderson S. 2005. *Soils: Genesis and Geomorphology*. Ed. University Press Cambridge. 1ª Edición. United Kingdom. 817 p.
- Schlegel F.G. 1997. *Microbiología General*. 7ª. Edición. Ed. Omega, S.A. Barcelona, España. 654 p.
- Sheng X.F., He L.Y., Huang W.Y. 2002. The conditions of releasing potassium by a silicate-dissolving bacterial strain NBT. *Agr. Sci. China.* (1) 662–666.
- Sheng X.F. 2005. Growth promotion and increased potassium uptake of cotton and rape by a potassium releasing strain of *Bacillus edaphicus*. *Soil. Biol. Biochem.* (37) 1918–1922.
- Shing C. y Li J. 2009. Evaluation of nutrient addition to diesel biodegradation in contaminated soils. *African Journal of Biotechnology.* 8(14) 3286-3293.
- Singh A., Ward O.P. 2004. *Applied bioremediation and phytoremediation*. Soil Biology. Vol. 1. Springer Verlag, Berlín, 281 p.
- Tarafdar J.C., Yadav R.S. y Meena S.C. 2001. Comparative efficiency of acid phosphatase originated from plant and fungal sources. *J. Plant. Nutr. Soil Sci.* 164(3) 279-282.
- Tiner R.W. 1999. *Wetland indicators: A Guide to Wetland Identification, Delineation, Classification and Mapping*. Ed. CRC Press LLC. United States of America. 392 p.

- Trujillo-Narcía A., Rivera-Cruz M.C. y Maldonado C.E. 2006. Efecto de la restauración de suelo contaminado con petróleo en el suelo y en la vegetación en Tabasco, México. En: Medioambiente en Iberoamérica. Visión desde la Física y la Química en los Albores del Siglo XXI. Gallardo L.J.F. (Ed). Badajoz, España. 353-361 pp.
- Trujillo-Narcía A. y Rivera-Cruz M.C. 2005. Evaluación de daños ambientales causados por un derrame de petróleo en histosoles en el campo petrolero La Venta, Tabasco. En: XVIII Reunión Científica-Tecnológica Forestal y Agropecuaria Tabasco 2005. INIFAP. 3 y 4 de Noviembre del 2005. Villahermosa, Tabasco. 324-339 pp.
- Uribe-Hernández R., Juárez-Méndez C.H., Montes de Oca M.A., Palacios-Vargas J.G., Cutz-Pool L. y Mejía-Recarmier B.E. 2010. Colémbolos (Hexapoda) como indicadores de la calidad de suelos contaminados con hidrocarburos en el sureste de México. Revista Mexicana de Biodiversidad. 81: 153-162.
- USDA (United States Department Agriculture). 1996. Soil Quality Indicators: Organic Matter. In: Soil Quality Information Sheet. 2 p.
- USDA (United States Department Agriculture). 2006. Claves para la Taxonomía de Suelos. 1ª. Edición. Montecillo, Texcoco, Estado de México. 331 p.
- Useche Y.M., Valencia H. y Pérez H. 2004. Caracterización de bacterias y hongos solubilizadores de fosfato bajo tres usos de suelo en el sur del trapecio amazónico. Acta Biológica Colombiana. 9(2) 2.
- Valenzuela F.E., Solís M.L., Martínez V.O. y Pinochet T.D. 2006. Hongos aislados desde suelos contaminados con petróleo. Boletín Micológico. 21, 35-41.
- Vandermeer J.H. 2009. The Ecology of Agroecosystems. Ed. Jones and Bartlett Publishers, LLC. USA. 387 p.
- Vásquez T.G.A.M. 2002. Ecología y Formación Ambiental. 2ª edición. Ed. McGraw-Hill Interamericana. México. D.F. 343 p.

- Vázquez L.D. 2006. Fitotoxicidad en *Crotalaria incana* L. y *Leucaena leucocephala* Lam. (Leguminosae) por suelo contaminado con petróleos nuevo e intemperizado. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados *Campus* Tabasco. H. Cárdenas, Tabasco. 126 p.
- Wang Z., Yang C., Kelly-Hooper F., Hollebone B.P., Peng X., Brown C.E., Landriault M., Sun J., Yang Z. 2009. Forensic differentiation of biogenic organic compounds from petroleum hydrocarbons in biogenic and petrogenic compounds cross-contaminated soils and sediments. *Journal of Chromatography*. 1216(7) 1174-1191.
- Wang X., Feng J. y Zhao J. 2010. Effects of crude oil residual on soil chemical properties in oil sites, Momoge Wetland, China. *Environ. Monit. Assess.* 161, 271-280.
- Wu S.C., Cao Z.H., Li Z.G., Cheung K.C., Wong M.H. 2005. Effects of biofertilizer containing N-fixer, P and K solubilizers and AM fungi on maize growth: a greenhouse trial. *Geoderma*. 125, 155-166.
- Wyszkowski M. y Ziolkowska A. 2008. Effect of petrol and diesel oil on content of organic carbon and mineral components in soil. *American-Eurasian Journal of Sustainable Agriculture*. 2(1) 54-60.
- Zavala-Cruz J., Gavi-Reyes F., Adams-Schroeder R.H., Ferrera-Cerrato R., Palma-López D., Vaquera-Huerta H. y Domínguez-Esquivel J.M. 2005. Derrames de petróleo en suelos y adaptación de pastos tropicales en el activo cinco presidentes, Tabasco, México. *Terra Latinoam.* 23, 293-302.
- Zeiger E. y Taiz L. 2007. *Fisiología Vegetal*. 3ª. Edición. Publicado por Universidad Jaume I. 1907 p.

SECCIÓN IX. APÉNDICE

A1. Análisis de varianza de variables respuesta en época de lluvias (30 de septiembre de 2009)

Cuadro 1. Análisis de varianza del pH.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F calculada	Pr>F
Modelo	8	2.1838	0.2730	5.11	0.0020
Error	18	0.9608	0.0534		
Total	26	3.1447			
R cuadrada	0.6944				
CV	5.9530				

Cuadro 2. Análisis de varianza del carbón orgánico.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F calculada	Pr>F
Modelo	8	506.4083	63.3010	379.16	<.0001
Error	18	3.0051	0.1669		
Total	26	509.4134			
R cuadrada	0.9941				
CV	3.0738				

Cuadro 3. Análisis de varianza del N total.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F calculada	Pr>F
Modelo	8	0.2499	0.0312		<.0001
Error	9	0	0		
Total	17	0.2499			
R cuadrada	1				
CV	0				

Cuadro 4. Análisis de varianza del P disponible.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F calculada	Pr>F
Modelo	8	2989.9462	373.7432		<.0001
Error	9	0	0		
Total	17	2989.9462			
R cuadrada	1				
CV	0				

Cuadro 5. Análisis de varianza de los HTP.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F calculada	Pr>F
Modelo	8	17491140907	2186392613	49.74	<.0001
Error	18	791278774	43959932		
Total	26	18282419681			
R cuadrada	0.9567				
CV	7.3089				

Cuadro 6. Análisis de varianza de las BFN en suelo a distancia.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F calculada	Pr>F
Modelo	8	3.3085 E12	416563884657	6.74	<.0001
Error	57	3.4989 E12	61385855245		
Total	65	6.8075 12			
R cuadrada	0.4860				
CV	113.1113				

Cuadro 7. Análisis de varianza de las BSP en suelo a distancia.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F calculada	Pr>F
Modelo	8	9.5654 E14	1.1957 E14	5.67	<.0001
Error	57	1.2029 E15	2.1103 E13		
Total	65	2.1594 E15			
R cuadrada	0.4430				
CV	149.8128				

Cuadro 8. Análisis de varianza de las BSK en suelo a distancia.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F calculada	Pr>F
Modelo	8	5.1849 E15	6.4811 E14	10.50	<.0001
Error	57	3.5198 E15	6.1751 E13		
Total	65	8.7047 E15			
R cuadrada	0.5956				
CV	81.1854				

Cuadro 9. Análisis de varianza de los HH en suelo a distancia.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F calculada	Pr>F
Modelo	8	755708199	94463525	12.54	<.0001
Error	57	429444488	7534114		
Total	65	1185152686			
R cuadrada	0.6376				
CV	65.0507				

Cuadro 10. Análisis de varianza de las BFN en suelo rizosférico.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F calculada	Pr>F
Modelo	8	2.5846 E12	323070861442	11.34	<.0001
Error	57	1.6240 E12	28491502058		
Total	65	4.2086 E12			
R cuadrada	0.6141				
CV	42.6533				

Cuadro 11. Análisis de varianza de las BSP en suelo rizosférico.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F calculada	Pr>F
Modelo	8	6.9880 E14	8.7350 E13	11.62	<.0001
Error	57	4.2838 E14	7.5155 E12		
Total	65	1.1272 E15			
R cuadrada	0.6199				
CV	79.8767				

Cuadro 12. Análisis de varianza de las BSK en suelo rizosférico.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F calculada	Pr>F
Modelo	8	5.9481 E14	7.4352 E13	3.55	0.0021
Error	57	1.1939 E15	2.0945 E13		
Total	65	1.7887 E15			
R cuadrada	0.3325				
CV	61.3683				

Cuadro 13. Análisis de varianza de los HH en suelo rizosférico.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F calculada	Pr>F
Modelo	8	468384080.9	58548010.1	12.43	<.0001
Error	57	268441849.6	4709506.1		
Total	65	736825930.4			
R cuadrada	0.6357				
CV	63.1921				

Cuadro 14. Análisis de varianza de las BFN en suelo a distancia.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F calculada	Pr>F
Modelo	11	3.8238 E12	347622235337	6.29	<.0001
Error	54	2.9837 E12	55253967361		
Total	65	6.8075 E12			
R cuadrada	0.5617				
CV	107.3123				

Cuadro 15. Análisis de varianza de las BSP en suelo a distancia.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F calculada	Pr>F
Modelo	11	2.1322 E15	1.9383 E14	383.72	<.0001
Error	54	2.7278 E13	505145910328		
Total	65	2.1594 E15			
R cuadrada	0.9874				
CV	23.1783				

Cuadro 16. Análisis de varianza de las BSK en suelo a distancia.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F calculada	Pr>F
Modelo	11	3.0421 E15	2.7655 E14	2.64	0.0090
Error	54	5.6627 E15	1.0486 E14		
Total	65	8.7047 E15			
R cuadrada	0.3495				
CV	105.7961				

Cuadro 17. Análisis de varianza de los HH en suelo a distancia.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F calculada	Pr>F
Modelo	11	908501202	82591018	16.12	<.0001
Error	54	276651484	5123176		
Total	65	1185152686			
R cuadrada	0.7666				
CV	53.6421				

Cuadro 18. Análisis de varianza de las BFN en suelo rizosférico.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F calculada	Pr>F
Modelo	11	1.1669 E12	106083966888	1.88	0.0624
Error	54	3.0416 E12	56327016168		
Total	65	4.2086 E12			
R cuadrada	0.2773				
CV	59.9727				

Cuadro 19. Análisis de varianza de las BSP en suelo rizosférico.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F calculada	Pr>F
Modelo	11	5.7674 E14	5.2431 E13	5.14	<.0001
Error	54	5.5045 E14	1.0193 E13		
Total	65	1.1272 E15			
R cuadrada	0.5117				
CV	93.0256				

Cuadro 20. Análisis de varianza de las BSK en suelo rizosférico.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F calculada	Pr>F
Modelo	11	9.9178 E14	9.0162 E13	6.11	<.0001
Error	54	7.9689 E14	1.4757 E13		
Total	65	1.7887 E15			
R cuadrada	0.5545				
CV	51.5118				

Cuadro 21. Análisis de varianza de los HH en suelo rizosférico.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F calculada	Pr>F
Modelo	11	274640655.2	24967332.3	2.92	0.0043
Error	54	462185275.3	8558986.6		
Total	65	736825930.4			
R cuadrada	0.3727				
CV	85.1895				

A2. Análisis de varianza de variables respuesta en época de nortes (30 de enero de 2010)

Cuadro 22. Análisis de varianza del pH.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F calculada	Pr>F
Modelo	8	14.9467	1.8683	0.82	0.5935
Error	18	40.8861	2.2714		
Total	26	55.8328			
R cuadrada	0.2677				
CV	32.2219				

Cuadro 23. Análisis de varianza del carbón orgánico.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F calculada	Pr>F
Modelo	8	97.6004	12.2000	91.47	<.0001
Error	18	2.4009	0.1334		
Total	26	100.0012			
R cuadrada	0.9760				
CV	3.5350				

Cuadro 24. Análisis de varianza del N total.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F calculada	Pr>F
Modelo	8	0.0454	0.0057		<.0001
Error	9	0	0		
Total	17	0.0454			
R cuadrada	1				
CV	0				

Cuadro 25. Análisis de varianza del P disponible.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F calculada	Pr>F
Modelo	8	4454.7874	556.8484		<.0001
Error	9	0	0		
Total	17	4454.7874			
R cuadrada	1				
CV	0				

Cuadro 26. Análisis de varianza de los HTP.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F calculada	Pr>F
Modelo	8	61697727257	7712215907	72.77	<.0001
Error	18	1907614877	105978604		
Total	26	63605342135			
R cuadrada	0.9700				
CV	10.7243				

Cuadro 27. Análisis de varianza de las BFN en suelo a distancia.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F calculada	Pr>F
Modelo	6	850731805	141788634	6.73	0.0005
Error	20	421157993	21057900		
Total	26	1271889799			
R cuadrada	0.6689				
CV	107.2727				

Cuadro 28. Análisis de varianza de las BSP en suelo a distancia.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F calculada	Pr>F
Modelo	6	4577072.796	762845.466	4.26	0.0064
Error	20	3583098.167	179154.908		
Total	26	8160170.963			
R cuadrada	0.5609				
CV	88.1874				

Cuadro 29. Análisis de varianza de las BSK en suelo a distancia.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F calculada	Pr>F
Modelo	6	1609178886	268196481	6.13	0.0009
Error	20	874733967	43736698		
Total	26	2483912852			
R cuadrada	0.6478				
CV	69.4072				

Cuadro 30. Análisis de varianza de los HH en suelo a distancia.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F calculada	Pr>F
Modelo	6	129012495	21502082.5	110.59	<.0001
Error	20	3888502	194425.1		
Total	26	132900997			
R cuadrada	0.9707				
CV	24.1604				

Cuadro 31. Análisis de varianza de las BFN en suelo rizosférico.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F calculada	Pr>F
Modelo	6	93291025130	15548504188	3.01	0.0292
Error	20	103354622233	5167731111.7		
Total	26	196645647363			
R cuadrada	0.4744				
CV	171.1714				

Cuadro 32. Análisis de varianza de las BSP en suelo rizosférico.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F calculada	Pr>F
Modelo	6	2.8114 E13	4.6856 E12	7.26	0.0003
Error	20	1.2909 E13	645441504102		
Total	26	4.1023 E13			
R cuadrada	0.6853				
CV	145.8096				

Cuadro 33. Análisis de varianza de las BSK en suelo rizosférico.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F calculada	Pr>F
Modelo	6	8.6624 E12	1.4437 E12	14.20	<.0001
Error	20	2.0336 E12	101680328667		
Total	26	1.0696 E13			
R cuadrada	0.8099				
CV	68.8169				

Cuadro 34. Análisis de varianza de los HH en suelo rizosférico.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F calculada	Pr>F
Modelo	6	249217973.3	41536328.9	286.58	<.0001
Error	20	2898780.3	144939.0		
Total	26	252116753.6			
R cuadrada	0.9885				
CV	22.3854				

Cuadro 35. Análisis de varianza de las BFN en suelo a distancia.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F calculada	Pr>F
Modelo	5	738612519	147722504	5.82	0.0016
Error	21	533277280	25394156		
Total	26	1271889799			
R cuadrada	0.5807				
CV	117.8009				

Cuadro 36. Análisis de varianza de las BSP en suelo a distancia.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F calculada	Pr>F
Modelo	5	6972429.407	1394485.881	24.66	<.0001
Error	21	1187741.556	56559.122		
Total	26	8160170.963			
R cuadrada	0.8544				
CV	45.5499				

Cuadro 37. Análisis de varianza de las BSK en suelo a distancia.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F calculada	Pr>F
Modelo	5	1726874839	345374968	9.58	<.0001
Error	21	757038014	36049429		
Total	26	2483912852			
R cuadrada	0.6952				
CV	63.0131				

Cuadro 38. Análisis de varianza de los HH en suelo a distancia.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F calculada	Pr>F
Modelo	5	57548680.3	11509736.1	3.21	0.0263
Error	21	75352316.7	3588205.6		
Total	26	132900997.0			
R cuadrada	0.4330				
CV	103.7927				

Cuadro 39. Análisis de varianza de las BFN en suelo rizosférico.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F calculada	Pr>F
Modelo	5	88907265457	17781453091	3.47	0.0194
Error	21	107738381906	5130399138.4		
Total	26	196645647363			
R cuadrada	0.4521				
CV	170.5520				

Cuadro 40. Análisis de varianza de las BSP en suelo rizosférico.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F calculada	Pr>F
Modelo	5	1.1879 E13	2.3758 E12	1.71	0.1757
Error	21	2.9144 E13	1.3879 E12		
Total	26	4.1022 E13			
R cuadrada	0.2896				
CV	213.8060				

Cuadro 41. Análisis de varianza de las BSK en suelo rizosférico.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F calculada	Pr>F
Modelo	5	9.7421 E12	1.9484 E12	42.89	<.0001
Error	21	953917065417	45424622163		
Total	26	1.0696 E13			
R cuadrada	0.9108				
CV	45.9963				

Cuadro 42. Análisis de varianza de los HH en suelo rizosférico.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F calculada	Pr>F
Modelo	5	114083094.6	22816618.9	3.47	0.0192
Error	21	138033659.1	6573031.4		
Total	26	252116753.6			
R cuadrada	0.4525				
CV	150.7489				

A3. Análisis de varianza de variables respuesta en época de seca (30 de abril de 2010)

Cuadro 43. Análisis de varianza del pH.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F calculada	Pr>F
Modelo	8	24.8265	3.1033	0.68	0.7016
Error	18	81.8618	4.5479		
Total	26	106.6883			
R cuadrada	0.2327				
CV	47.0088				

Cuadro 44. Análisis de varianza del carbón orgánico.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F calculada	Pr>F
Modelo	8	172685233.9	21585654.2	1	0.4696
Error	18	388908291.8	21606016.2		
Total	26	561593525.8			
R cuadrada	0.3075				
CV	513.0317				

Cuadro 45. Análisis de varianza del N total.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F calculada	Pr>F
Modelo	8	0.0524	0.0066		<.0001
Error	9	0	0		
Total	17	0.0524			
R cuadrada	1				
CV	0				

Cuadro 46. Análisis de varianza del P disponible.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F calculada	Pr>F
Modelo	8	6036	754.5		<0.0001
Error	9	0	0		
Total	17	6036			
R cuadrada	1				
CV	0				

Cuadro 47. Análisis de varianza de los HTP.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F calculada	Pr>F
Modelo	8	27409473884	3426184236	653.15	<.0001
Error	18	94421579	5245643		
Total	26	27503895463			
R cuadrada	0.9966				
CV	9.1208				

Cuadro 48. Análisis de varianza de las BFN en suelo a distancia.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F calculada	Pr>F
Modelo	8	887201266393	110900158299	11.54	<.0001
Error	45	432278660760	9606192461.3		
Total	53	1.3195 E12			
R cuadrada	0.6724				
CV	75.9847				

Cuadro 49. Análisis de varianza de las BSP en suelo a distancia.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F calculada	Pr>F
Modelo	8	1.5452 E13	1.9315 E12	15.03	<.0001
Error	45	5.7834 E12	128520915815		
Total	53	2.1235 E13			
R cuadrada	0.7277				
CV	58.2776				

Cuadro 50. Análisis de varianza de las BSK en suelo a distancia.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F calculada	Pr>F
Modelo	8	320055355504	40006919438	4.19	0.0008
Error	45	429669498156	9548211070.1		
Total	53	749724853659			
R cuadrada	0.4269				
CV	60.7845				

Cuadro 51. Análisis de varianza de los HH en suelo a distancia.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F calculada	Pr>F
Modelo	8	2542722117	317840265	32.95	<.0001
Error	45	434065046	9645890		
Total	53	2976787163			
R cuadrada	0.8542				
CV	35.4834				

Cuadro 52. Análisis de varianza de las BFN en suelo rizosférico.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F calculada	Pr>F
Modelo	8	1.5026 E13	1.8782 E12	3.96	0.0013
Error	45	2.1331 E13	474023909544		
Total	53	3.6357 E13			
R cuadrada	0.4133				
CV	122.8663				

Cuadro 53. Análisis de varianza de las BSP en suelo rizosférico.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F calculada	Pr>F
Modelo	8	22396349022	2799543628	5.03	0.0002
Error	45	25038564171	556412537		
Total	53	43474913193			
R cuadrada	0.4721				
CV	119.8229				

Cuadro 54. Análisis de varianza de las BSK en suelo rizosférico.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F calculada	Pr>F
Modelo	8	4.6226 E13	5.7783 E12	3.10	0.0072
Error	45	8.3987 E13	1.8664 E12		
Total	53	1.3021 E14			
R cuadrada	0.3550				
CV	116.1014				

Cuadro 55. Análisis de varianza de los HH en suelo rizosférico.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F calculada	Pr>F
Modelo	8	26958736504	3369842063	6.27	<.0001
Error	45	24194838686	537663082		
Total	53	51153575190			
R cuadrada	0.5270				
CV	167.4887				

Cuadro 56. Análisis de varianza de las BFN en suelo a distancia.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F calculada	Pr>F
Modelo	7	514737439243	73533919892	4.20	0.0012
Error	46	804742487910	17494401911		
Total	53	1.3195 E12			
R cuadrada	0.3901				
CV	102.5416				

Cuadro 57. Análisis de varianza de las BSP en suelo a distancia.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F calculada	Pr>F
Modelo	7	8.9335 E12	1.2762 E12	4.77	0.0004
Error	46	1.2302 E13	267431186079		
Total	53	2.1235 E13			
R cuadrada	0.4207				
CV	84.0661				

Cuadro 58. Análisis de varianza de las BSK en suelo a distancia.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F calculada	Pr>F
Modelo	7	92507762037	13215394577	0.92	0.4963
Error	46	657217091622	14287328079		
Total	53	749724853659			
R cuadrada	0.1234				
CV	74.3545				

Cuadro 59. Análisis de varianza de los HH en suelo a distancia.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F calculada	Pr>F
Modelo	7	2095756689	299393813	15.63	<.0001
Error	46	881030474	19152836		
Total	53	2976787163			
R cuadrada	0.7040				
CV	50.0001				

Cuadro 60. Análisis de varianza de las BFN en suelo rizosférico.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F calculada	Pr>F
Modelo	7	2.0228 E13	2.8898 E12	8.24	<.0001
Error	46	1.6128 E13	350616729295		
Total	53	3.6357 E13			
R cuadrada	0.5564				
CV	105.6694				

Cuadro 61. Análisis de varianza de las BSP en suelo rizosférico.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F calculada	Pr>F
Modelo	7	11137414441	1591059206	2.02	0.0732
Error	45	36297498751	789076060		
Total	53	47434913193			
R cuadrada	0.2348				
CV	142.6924				

Cuadro 62. Análisis de varianza de las BSK en suelo rizosférico.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F calculada	Pr>F
Modelo	7	6.2023 E13	8.8604 E12	5.98	<.0001
Error	46	6.8190 E13	1.4824 E12		
Total	53	1.3021 E14			
R cuadrada	0.4763				
CV	103.4712				

Cuadro 63. Análisis de varianza de los HH en suelo rizosférico.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F calculada	Pr>F
Modelo	7	23930102114	3418586016	5.78	<.0001
Error	46	27223473076	591814632		
Total	53	51153575190			
R cuadrada	0.4678				
CV	175.7208				