



**UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO**

**DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS**

---



## **TESIS**

**Percepción olfativa como criterio para evaluar la efectividad de la restauración de suelos contaminados con petróleo crudo.**

Que para obtener el grado de

**Doctor en Ciencias en Ecología y Manejo de Sistemas Tropicales**

Presenta:

**SAÚL LÓPEZ AGUILAR**

Director:

**Dr. RANDY HOWARD ADAMS SCHROEDER**

Co-director:

**Dra. VERÓNICA ISIDRA DOMÍNGUEZ RODRÍGUEZ**

Villahermosa, Tabasco.

Noviembre de 2020

---



**UNIVERSIDAD JUÁREZ  
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



**DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS  
DIRECCIÓN**



Villahermosa, Tab., a 24 de Noviembre de 2020

**ASUNTO:** Autorización de Modalidad de Titulación

**C. LIC. MARIBEL VALENCIA THOMPSON  
JEFE DEL DEPTO. DE CERTIFICACIÓN Y TITULACION  
DIRECCIÓN DE SERVICIOS ESCOLARES  
P R E S E N T E**

Por este conducto y de acuerdo a la solicitud correspondiente por parte del interesado, informo a usted, que en base al reglamento de titulación vigente en esta Universidad, ésta Dirección a mi cargo, autoriza al **C. SAÚL LÓPEZ AGUILAR** egresado del Doctorado en **CIENCIAS EN ECOLOGÍA Y MANEJO DE SISTEMAS TROPICALES** de la División Académica de **CIENCIAS BIOLÓGICAS** la opción de titularse bajo la modalidad de Tesis de Doctorado denominado: **"PERCEPCIÓN OLFATIVA COMO CRITERIO PARA EVALUAR LA EFECTIVIDAD DE LA RESTAURACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS CON PETRÓLEO CRUDO"**.

Sin otro particular, aprovecho la ocasión para saludarle afectuosamente.

**A T E N T A M E N T E**

  
**DR. ARTURO GARRIDO MORA  
DIRECTOR DE LA DIVISIÓN ACADÉMICA  
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS**

C.c.p.- Expediente Alumno de la División Académica  
C.c.p.- Interesado

**UJAT  
DIVISIÓN ACADÉMICA  
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS**



**DIRECCIÓN**



**UNIVERSIDAD JUÁREZ  
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



**DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS  
DIRECCIÓN**

NOVIEMBRE 24 DE 2020

**C. SAÚL LÓPEZ AGUILAR  
PAS. DEL DOCTORADO EN CIENCIAS EN ECOLOGÍA Y  
MANEJO DE SISTEMAS TROPICALES  
P R E S E N T E**

En virtud de haber cumplido con lo establecido en los Arts. 80 al 85 del Cap. III del Reglamento de titulación de esta Universidad, tengo a bien comunicarle que se le autoriza la impresión de su Trabajo Recepcional, en la Modalidad de Tesis de Doctorado en Ciencias en Ecología y Manejo de Sistemas Tropicales titulado: **"PERCEPCIÓN OLFATIVA COMO CRITERIO PARA EVALUAR LA EFECTIVIDAD DE LA RESTAURACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS CON PETRÓLEO CRUDO"**, asesorado por Dr. Randy Howard Adams Schroeder y Dra. Verónica Isidra Domínguez Rodríguez, cuyo jurado está integrado por el Dr. Joel Zavala Cruz, Dr. José Ángel Gaspar Génico, Dr. Randy Howard Adams Schroeder, Dra. Verónica Isidra Domínguez Rodríguez, Dr. Rodolfo Gómez Cruz, Dra. Violeta Ruiz Carrera y Dr. Carlos Alfonso Álvarez González.

Por lo cual puede proceder a concluir con los trámites finales para fijar la fecha de examen.

Sin otro particular, me es grato enviarle un cordial saludo.

**ATENTAMENTE**  
**ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE**

**DR. ARTURO GARRIDO MORA**  
**DIRECTOR**

C.c.p.- Expediente del Alumno.  
C.c.p.- Archivo

**UJAT**  
**DIVISIÓN ACADÉMICA**  
**DE CIENCIAS BIOLÓGICAS**  
  
**DIRECCIÓN**

**Consortio de**  
**Universidades**  
**Mexicanas**  
UNA ALIANZA DE CALIDAD POR LA EDUCACIÓN SUPERIOR

**KM. 0.5 CARR. VILLAHERMOSA-CÁRDENAS ENTRONQUE A BOSQUES DE SALOYA**  
Tel. (993) 358-1500 Ext. 6400 y 6401, 337-9611, 337-9706, Fax (993) 354-4308 y 358-1579  
 Usar papel reciclado economiza energía, evita contaminación y despilfarro de agua y ayuda a conservar los bosques

[www.ujat.mx](http://www.ujat.mx)

## CARTA AUTORIZACIÓN


El que suscribe, autoriza por medio del presente escrito a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco para que utilice tanto física como digitalmente el Trabajo Recepcional en la modalidad de Tesis de doctorado denominado: **“PERCEPCIÓN OLFATIVA COMO CRITERIO PARA EVALUAR LA EFECTIVIDAD DE LA RESTAURACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS CON PETRÓLEO CRUDO”**, de la cual soy autor y titular de los Derechos de Autor.

La finalidad del uso por parte de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco el Trabajo Recepcional antes mencionada, será única y exclusivamente para difusión, educación y sin fines de lucro; autorización que se hace de manera enunciativa más no limitativa para subirla a la Red Abierta de Bibliotecas Digitales (RABID) y a cualquier otra red académica con las que la Universidad tenga relación institucional.

Por lo antes manifestado, libero a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco de cualquier reclamación legal que pudiera ejercer respecto al uso y manipulación de la tesis mencionada y para los fines estipulados en éste documento.

Se firma la presente autorización en la ciudad de Villahermosa, Tabasco a los 24 días del mes de noviembre de dos mil veinte.

AUTORIZO

  
\_\_\_\_\_  
SAÚL LÓPEZ AGUILAR

## DEDICATORIA

A la memoria de mis padres

**Saúl López Cruz (†) y Rosita Aguilar Benítez (†)**

por su legado de amor, sabiduría, trabajo y perseverancia.

Los llevo en el corazón.

A mi querida esposa **Lupita** y a mi adorada hija **Carolina**

Por todo el amor que me brindan, por ser mi inspiración y fuerza en todos mis proyectos.

Las amo.

**A mis hermanos y hermanas**

Por su apoyo incondicional y por su cariño en todos los momentos de mi vida.

Gracias por creer en mí.

**A mis sobrinos y sobrinas**

Por hacer feliz cada uno de mis momentos con sus alegrías y con sus muestras de cariño.

Gracias por tanto amor.

## AGRADECIMIENTOS

Primeramente, gracias a Dios, por la bendición de haber realizado uno de mis sueños profesionales, por haberme guiado y dado fortaleza en todos los instantes de mi vida, en especial en esta etapa.

A la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas por brindarme la oportunidad y el apoyo para fortalecer mi formación profesional y con ello contribuir en la educación de calidad de la juventud chiapaneca.

A la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco por aceptarme en sus espacios educativos y por brindarme apoyo profesional a través de cada uno de sus docentes e investigadores y la infraestructura y recursos del Laboratorio de Remediación.

A mis asesores, Dr. Randy Howard Adams Schroeder y Dra. Verónica Isidra Domínguez Rodríguez por aceptarme en su equipo de trabajo, por compartir sus conocimientos y experiencias en un área con muchas novedades para mí, por su confianza, por su apoyo y afecto que facilitaron la realización de este proyecto. Les estaré eternamente agradecido.

A mis tutores, Dr. Joel Zavala Cruz, Dra. Edith Hernández Nataren y Dr. José Ángel Gaspar Génico, por el acompañamiento, por sus observaciones y críticas puntuales durante el desarrollo de este proyecto. Aprecio sus contribuciones y el tiempo que me dedicaron.

A los colaboradores del Laboratorio de Remediación y compañeros tesisistas por brindarme su apoyo y amistad en este proceso, muchas gracias: Contadora Norma, Maestros Liliana, Paco, Gerónimo, Laura y Kriss, Doctores Eduardo Baltierra Trejo y Gilberto Morales Guzmán, Ingenieros Pascual, Fabián, Alex, Fidel, Mariana, Fanny, Fernando, Eder, Anahí, y todos aquellos que escapan a mi memoria.

A mis compañeros de trabajo en la UNICACH: Mtro. Orlando Mijangos Hernández, Dra. Matilde Cano Moguel, Dr. Salomé Bustos Ortíz y Lic. Edilberto Ortíz García, por su amistad y lealtad a través del tiempo.

# CONTENIDO

<b>CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN GENERAL</b> .....	1
1.1 OBJETIVOS .....	6
1.1.1 <i>Objetivo general</i> .....	6
1.1.2 <i>Objetivos específicos</i> .....	6
1.2 HIPÓTESIS .....	6
1.3 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....	7
1.3.1 <i>Concepto de Suelo</i> .....	7
1.3.2 <i>Componentes del suelo</i> .....	7
1.3.2.1 <i>La Fracción orgánica</i> .....	7
1.3.2.2 <i>La Fracción inorgánica</i> .....	7
1.3.2.3 <i>Atmósfera del suelo (aire)</i> .....	7
1.3.2.4 <i>El Agua</i> .....	8
1.3.3 <i>Estructura del suelo</i> .....	8
1.3.4 <i>Formación de los suelos</i> .....	9
1.3.4.1 <i>Roca</i> .....	9
1.3.4.2 <i>Clima</i> .....	9
1.3.4.3 <i>Organismos vivos</i> .....	9
1.3.4.4 <i>Geomorfología</i> .....	9
1.3.4.5 <i>Tiempo</i> .....	9
1.3.5 <i>Horizonación</i> .....	9
1.3.6 <i>Fertilidad del suelo</i> .....	10
1.3.7 <i>Propiedades fisicoquímicas</i> .....	10
1.3.7.1 <i>El potencial de hidrógeno (pH)</i> .....	10
1.3.7.2 <i>La conductividad eléctrica</i> .....	10
1.3.7.3 <i>La Materia orgánica (M.O.)</i> .....	11
1.3.7.4 <i>Capacidad de campo (CC)</i> .....	11
1.3.7.5 <i>La textura</i> .....	11
1.3.7.6 <i>Capacidad de intercambio catiónico y cationes intercambiables</i> .....	11
1.3.7.7 <i>Densidad aparente (DA)</i> .....	12
1.3.7.8 <i>Densidad real (DR)</i> .....	12
1.3.7.9 <i>Porosidad: Espacio vacío</i> .....	12
1.3.7.10 <i>Repelencia al agua</i> .....	12
1.3.8 <i>Suelos aluviales</i> .....	13
1.3.8.1 <i>El aluvión</i> .....	13
1.3.8.2 <i>Suelos Fluvisoles y Gleysoles</i> .....	15
1.3.8.3 <i>Suelos Arenosoles</i> .....	20
1.4 EL PETRÓLEO .....	22
1.4.1 <i>Definición de Petróleo</i> .....	22
1.4.2 <i>Fases sólida, líquida y gaseosa</i> .....	22

1.4.3 Componentes del petróleo .....	22
1.4.4 Clasificación de los Hidrocarburos .....	23
1.4.4.1 Los hidrocarburos saturados .....	23
1.4.4.2 Los hidrocarburos aromáticos .....	23
1.4.4.3 Las resinas y compuestos polares (NSO) .....	23
1.4.4.4 Los asfaltenos .....	23
1.4.5 Características físicas del petróleo crudo .....	24
1.4.5.1 Gravedad API .....	24
1.4.5.2 La viscosidad .....	25
1.4.6 Tipos de Petróleo en México .....	25
1.4.6.1 Olmeca .....	25
1.4.6.1 Istmo .....	25
1.4.6.3 Maya .....	25
1.4.7 Contaminación del suelo con Petróleo Crudo .....	25
1.4.8 Técnicas de saneamiento de suelos contaminados con hidrocarburos .....	27
1.4.9 Estrategia de remediación .....	28
1.4.9.1 Destrucción o modificación .....	28
1.4.9.2 Extracción o separación .....	28
1.4.9.3 Aislamiento o inmovilización .....	28
1.4.10 Lugar de realización del proceso de remediación .....	28
1.4.10.1 Tratamiento <i>in situ</i> .....	28
1.4.10.2 Tratamiento <i>on site</i> .....	28
1.4.10.3 Tratamiento <i>off site</i> .....	28
1.4.11 Tipo de tratamiento .....	28
1.4.11.1 Tratamientos térmicos .....	28
1.4.11.2 Tratamientos biológicos (biorremediación) .....	29
1.4.11.3 Tratamientos fisicoquímicos .....	29
1.4.12 Tratamiento de hidrocarburos intemperizados .....	30
1.4.12.1 Biorremediación .....	31
1.4.12.2 Tratamiento químico de desorción alcalina .....	31
1.4.12.3 Fitorremediación .....	31
1.4.12.4 Ácidos húmicos .....	31
1.4.12.5 Estabilización-Solidificación .....	32
1.4.12.6 Desorción Térmica .....	32
1.4.12.7 Pirólisis .....	32
1.4.12.8 Incineración .....	32
1.4.12.9 Vitrificación .....	32
1.5.1 Análisis Sensorial .....	32
1.5.2 El olfato .....	33
1.5.3 El olor .....	33
1.5.4 La percepción .....	34
1.5.5 Procedimiento de Evaluación sensorial .....	34



1.5.6 Tipos de Pruebas sensoriales .....	35
1.5.6.1 Las pruebas afectivas .....	35
1.5.6.2 Las pruebas discriminatorias .....	35
1.5.6.3 Las pruebas descriptivas .....	35
1.5.6.4 Las pruebas cualitativas .....	36
1.5.7 Tipos de jueces .....	36
1.5.7.1 Juez analítico .....	36
1.5.7.2 Juez afectivo .....	36
1.5.8 Número de jueces .....	36
1.5.9 Requisitos que deben cumplir los jueces .....	37
1.5.10 Escalas de medición .....	37
1.5.10.1 Escalas Nominales .....	37
1.5.10.2 Escalas Ordinales .....	38
1.5.10.3 Escalas de Intervalo .....	38
Referencias .....	40
<b>CAPITULO II Soil Odor as An Extra-Official Criterion for Qualifying Remediation Projects of Crude Oil-Contaminated Soil</b> .....	47
Abstract .....	50
1. Introduction .....	51
2. Materials and Methods .....	52
2.1 Selection of Soil and Crude Oil Samples, Experimental Cell Preparation, Simulation of Contamination and Remediation .....	52
2.2 Initial Characterization of Soil and Determination of Fertility Parameters .....	55
2.3 Critical Moisture Content .....	55
2.4 Total Petroleum Hydrocarbons .....	56
2.5 Earthworm Bioassays .....	56
2.6 Odor Perception Test .....	56
2.7 Ethics .....	57
3. Results .....	57
3.1 Characterization of Initial and Treated Soil Samples .....	57
3.2 Water Repellency .....	58
3.3 Critical Moisture Content .....	59
3.4 Field Capacity .....	59
3.5 Toxicity .....	60
3.6 Soil Odor Perception .....	60
3.7 Relationship between Smell, Soil Fertility and Toxicity .....	54
4. Conclusions .....	69
Referencias .....	71
Supplementary Materials .....	77
<b>CAPITULO III Percepción de olor en suelos contaminados con petróleo en comunidades rurales de acuerdo a su historia de exposición previa</b> .....	90
Abstract .....	92

Resumen .....	93
1. Introducción .....	93
2. Materiales y Métodos .....	95
2.1 Selección de comunidades rurales para pruebas de percepción de olores .....	95
2.2 Prueba de percepción de olor .....	97
2.3 Ética .....	99
3. Resultados .....	99
3.1 Características de la muestras iniciales y tratadas .....	99
3.2 Repelencia al agua .....	99
3.3 Contenido de Humedad Crítica .....	100
3.4 Capacidad de campo .....	100
3.5 Toxicidad .....	101
3.6 Prueba de Percepción de Olor .....	101
3.7 Análisis estadístico .....	105
3.8 Relación entre olor, fertilidad del suelo y toxicidad .....	107
Conclusiones .....	115
Referencias .....	117
<b>CAPITULO IV CONCLUSIONES GENERALES</b> .....	119
<b>ANEXOS TECNICOS</b> .....	121
a) Observaciones sobre cómo llevar a cabo las pruebas en campo .....	122
b) Observaciones de la percepción de la mujer (Caso en la comunidad Francisco J. Mújica) .....	123
c) Observaciones sobre la percepción de personas que han trabajado en remediación/industria petrolera vs los que no han trabajado en estas actividades (Caso en la comunidad Francisco J. Mújica) .....	124
d) Observaciones sobre la percepción de personas adultos mayores de ambas comunidades que participaron en la prueba de olor .....	125
Referencias .....	125

## CONTENIDO DE TABLAS

### CAPITULO I

Tabla 1. Factores formadores y uso de los suelos Fluvisoles y Gleysoles .....	15
Tabla 2. Factores, procesos formadores y características de los Fluvisoles y Gleysoles.	16
Tabla 3. Subunidades de los suelos Fluvisoles .....	17
Tabla 4. Subunidades de los suelos Gleysoles .....	18
Tabla 5. Subunidades de los suelos Arenosoles .....	21
Tabla 6. Clasificación del petróleo según el Instituto Americano del Petróleo .....	25
Tabla 7. Técnicas de remediación de suelos .....	29
Tabla 8. Parámetros que son determinantes en la selección de una tecnología de remediación de suelos .....	30
Tabla 9. Diversos tipos de pruebas de evaluación sensorial .....	36

### CAPITULO II

Table 1. Critical humidity in Fluvisol and Gleysol .....	59
Table 2. Criteria and values for odor perception .....	61
Table 3. Correlations of odor perception with Total Petroleum Hydrocarbons (TPH), Field Capacity and Water repellency .....	65
Table 4. Evaluation: when they say “it is good to plant”, is it really satisfactory?— Fluvisol .....	67
Table 5. Evaluation: When they say “it is good to plant”, is it really satisfactory?— Gleysol .....	68
Table 6. Evaluation: when they say “it is good to plant”, is it really satisfactory?— Arenosol .....	68

### Supplementary Material

Table S1. Characterization of uncontaminated soils .....	84
Table S2. Initial fertility parameters in contaminated soils .....	84
Table S3. Classification of the severity of water repellency evaluated by the MED method and expressed as molarity, proposed by King (1981). .....	87
Table S4. Classification of the WDPT proposed by Dekker & Jungerius.....	87
Table S5. Repellency (MED y WDTP) in contaminated soils treated by bioremediation and natural attenuation for 18 months .....	88
Table S6. Weight loss of organisms in acute toxicity tests by direct contact .....	88

### CAPITULO III

Tabla 1. Criterios y valores de la percepción de olor .....	103
Tabla 2. Análisis de Varianzas (ANOVA) y Prueba de Múltiples Rangos (PMR) .....	106
Tabla 3. Análisis de cuando la gente dice “está bien”, realmente ¿está bien? en suelos Fluvisol y Gleysol -Ría. Los Cerros .....	111

Tabla 4. Análisis de cuando la gente dice “está bien”, realmente ¿está bien?, en suelo Arenosol- Ría. Los Cerros .....	112
Tabla 5. Análisis de cuando la gente dice “está bien”, realmente ¿está bien? en suelos Fluvisol y Gleysol -Ría. Francisco J. Mújica .....	113
Tabla 6. Análisis de cuando la gente dice “está bien”, realmente ¿está bien?, en suelo Arenosol -Ría. Francisco J. Mújica .....	114

## **ANEXOS TÉCNICOS**

Tabla 1A. Comparación de respuestas de una mujer participante y las respuestas promedio de los varones en la comunidad Francisco J. Mújica .....	123
Tabla 2A. Percepción de personas con experiencia vs personas sin experiencia en remediación/industria petrolera .....	124
Tabla 3A. Percepción de adultos mayores vs personas de menor edad .....	125

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.  
México.

## CONTENIDO DE FIGURAS

### CAPITULO I

Figura 1. Disposición en el espacio de los agregados constituyentes de un suelo .....	8
Figura 2. Horizontes del suelo .....	10
Figura 3. Grupos de suelos del estado de Tabasco, México, clasificados de acuerdo con la Base Referencial Mundial de Suelo (IUSS et al., 2007) .....	14
Figura 4. Perfiles de los suelos Gleysols y Fluvisols .....	19
Figura 5. Perfil de los suelos Arenosols .....	20
Figura 6. Familia de hidrocarburos en el petróleo crudo .....	23
Figura 7. Funcionamiento del sentido del olfato .....	34
Figura 8. Ejemplo de escala hedónica facial .....	39

### CAPITULO II

Figure 1. Bioremediation and natural attenuation treatment cells. Above: recently prepared treatment cells. Below: cells after several months of treatment. Note that many cells became naturally vegetated with weedy plants, principally grasses and sedges .....	54
Figure 2. Intensity of petroleum odor in soil: a) In Fluvisol, b) in Gleysol, c) in Arenosol .....	62
Figure 3. Acceptance level for odor in soil. a) In Fluvisol, b) in Gleysol, c) in Arenosol ..	53

### Supplementary Material

Figure S1. Experimental design .....	77
Figure S2. a), b) Format used in the olfactory perception test .....	79
Figure S3. Acceptance form for participation in an investigation .....	81
Figure S4. Panelist data sheet .....	83
Figure S5. TPH degradation in contaminated soils with medium crude oil without fertilizer .....	85
Figure S6. TPH degradation in contaminated soils with medium crude oil with fertilizer .....	85
Figure S7. TPH degradation in contaminated soils with heavy crude oil without fertilizer .....	86
Figure S8. TPH degradation in contaminated soils with heavy crude oil with fertilizer ..	86
Figure S9. Field capacity in contaminated soils with medium and heavy crude oil .....	87

### CAPITULO III

Figura 1. Ubicación de las comunidades participantes en la prueba de olor .....	98
Figura 2. Evaluación de la Intensidad de olor entre panelistas urbanos y rurales .....	103

Figura 3. Evaluación de nivel de aceptación del olor entre panelistas urbanos y rurales .....	104
Figura 4. Evaluación de la aceptación de olor en suelo Arenosol por panelistas urbanos	109

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.  
México.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.

**CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN GENERAL**

## CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN GENERAL

Para muchos países, el petróleo es el motor que mueve sus economías, aunque esta actividad los vuelve altamente vulnerables al deterioro de la calidad ambiental de sus ecosistemas silvestres y agroecosistemas. A nivel mundial, la contaminación de suelos y cuerpos de agua con hidrocarburos es cada vez más extensa, generalmente a causa de los derrames por prácticas inadecuadas o accidentes durante los procesos de exploración, extracción y transporte de hidrocarburos, generando con ello deterioros en la estructura y bioprocesos de los ecosistemas, con repercusiones directas sobre la biota (Cuevas-Díaz *et al.*, 2012; Velasquez-Arias, 2017).

Los impactos negativos de la industria petrolera no solo corresponden a cuestiones ambientales, en muchos de los casos también conlleva a generar impactos económicos en la sociedad al afectar las actividades productivas, tales como la pesca, la ganadería o el cultivo de productos agroalimentarios, que, al sufrir las consecuencias de la contaminación, desencadena una serie de afectaciones directas e indirectas de tipo social que incluye los sistemas de producción, la salud, la economía y las formas de vida de las poblaciones. Los derrames de petróleo acontecen principalmente en las zonas rurales agrícolas, donde generalmente existe rezago socioeconómico, pobreza alimentaria y marginación (Cavazos-Arroyo *et al.*, 2014).

En el caso de México, la paraestatal Petróleos Mexicanos ha reportado del año 2010 al 2019 un total de 3,489 eventos relacionados con fugas y derrames de hidrocarburos, siendo los estados de Campeche, Tabasco y Veracruz los más afectados. En esta estadística no se incluye las fugas y derrames originados por tomas clandestinas. El suelo ha sido el recurso más degradado, ya que el 99 % de los derrames ocurrieron sobre él, mientras que el 1 % restante tuvo lugar sobre el agua (PEMEX, 2018).

El crudo ligero y el petróleo refinado (como diésel y gasolina) penetran fácilmente en el suelo y llegan a las capas freáticas, mientras que los sólidos y grasas permanecen en la superficie o son desplazados a tierras más bajas. La toxicidad de los hidrocarburos de petróleo en el suelo depende de varios factores tales como: los componentes del ecosistema, la concentración y las propiedades físicas y químicas del hidrocarburo del crudo, la intemperie y la biodisponibilidad; así como la composición del suelo (Hernández-Valencia *et al.*, 2017), siendo los hidrocarburos aromáticos de bajo punto de ebullición los de mayor toxicidad para casi todos los organismos terrestres y marinos. Por otra parte, algunos de los hidrocarburos parafínicos son menos tóxicos y hasta no tóxicos para los seres vivos.



El petróleo presente en el suelo es absorbido por la materia particulada y degradado biológica o físicamente, disminuyendo su toxicidad, pero aumentando su persistencia. A corto plazo, el petróleo y las fracciones del mismo que contienen componentes asfálticos no se degradan significativamente, son menos tóxicos, pero pueden permanecer en el ambiente por mucho más tiempo. Los suelos tropicales probablemente tienen las condiciones óptimas para favorecer a la degradación del crudo, pero existen otros factores ambientales que incrementan la toxicidad de los hidrocarburos, como son: el pH, la temperatura y la irradiación (Bravo, 2007).

En México, los proyectos de caracterización y remediación de sitios contaminados por hidrocarburos se regulan mediante un sistema de leyes, reglamentos y normas, que en su conjunto procuran garantizar que el sitio remediado cumpla con tres objetivos fundamentales: 1) Proteger al ambiente, incluyendo los seres vivos y los procesos biológicos; 2) Proteger a la salud pública, y 3) Restaurar el sitio para que pueda ser aprovechado, en el contexto social, de acuerdo a su vocación natural o actividad prevista por un programa de desarrollo urbano, tal y como lo establece la LGEEPA en su Artículo 134 fracción V (LGEEPA, 2018). Esto comprende acciones que reduzcan la toxicidad, potencial de lixiviación y contaminación de cuerpos de agua y acuíferos, del mismo modo el restablecimiento de las propiedades físicas y químicas ligadas a la fertilidad del suelo (Adams et al., 2015; López-Aguilar et al., 2020).

Respecto a los sitios contaminados por hidrocarburos, el diagnóstico se realiza de acuerdo al tipo y concentración de los hidrocarburos en el sitio, así como el uso de suelo, ya sea industrial u otro, fijando "Límites Máximos Permisibles" (LMP), mismos que deben estar sustentados técnicamente para dar certidumbre a la efectividad de los resultados y asegurar que se cumplan los objetivos de la remediación de acuerdo a la NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012 (SEMARNAT, 2013), aunque en los hechos esto no ocurre. Para vigilar el cumplimiento de los Límites Máximos Permisibles (LMP) normados, se ha establecido un proceso para acreditar individuos, empresas e instituciones que legalmente son facultados para la toma y análisis de las muestras de suelo del sitio contaminado/remediado. Para asegurar la correcta aplicación de los LMP, se espera que los mecanismos sociales estén funcionando, ya que son individuos en las instituciones los que vigilan a las empresas que realizan la remediación, y estos pueden no ser éticos (Adams et al., 2008c; Cuevas-Díaz et al., 2012).

En ese contexto, algunos individuos, por ejemplo, los signatarios y laboratorios acreditados, pueden ser corruptibles y modificar la toma de muestras, análisis de la misma o reporte del análisis

para beneficiar una de las partes interesadas a cambio de una gratificación económica extra (Cuevas-Díaz et al., 2012). Esta misma situación puede presentarse entre las autoridades ambientales encargadas de vigilar a las empresas de remediación, así como los supervisores encargados de obra por parte de la empresa petrolera. Esto pone en duda la verdadera aplicación de los LMP en los sitios contaminados/remediados, ya que no hay garantía de que los suelos tratados recuperen su fertilidad. Frecuentemente, estos suelos pueden presentar repelencia al agua, reducción en la capacidad de campo y en algunos casos problemas de compactación (suelos de arcillas rojas) (De la Cruz-Morales, 2014; Domínguez-Rodríguez et al., 2020).

En la práctica los prestadores de servicio (empresas de remediación) en conjunto con los supervisores de obra (de la empresa responsable por la contaminación), así como propietarios afectados comúnmente utilizan como criterio *de facto* el olfato (a través del olor del suelo), como instrumento para la evaluación de la efectividad de la remediación (Discovery Channel, 2007; Trujillo-Narcia et al., 2012).

El olfato, al igual que el sentido del gusto, es un sentido químico, por su capacidad de detectar sustancias químicas volátiles en el ambiente al momento en que respiramos. Al compararlo con cualquier otro de nuestros sentidos, el sentido del olfato es 10,000 veces más sensible y el reconocimiento del olor es inmediato aun si se encuentran en bajas concentraciones en el aire, enviando la información directamente al cerebro (Rodríguez-Gil, 2004; Toro-Gómez, 2013). Las moléculas de olor, de manera general son compuestos orgánicos de bajo peso molecular con la característica de que pueden ser alifáticos o aromáticos, inclusive pueden estar saturados o insaturados y pueden tener diversos grupos polares funcionales. Aunque cabe destacar que, muchas moléculas con estas características son inodoras (Poivet et al., 2018). El olor del petróleo obedece a las características y composición del aceite crudo y la variación de olores en otros aceites depende de la cantidad de hidrocarburos ligeros y de las impurezas. Por esto, los olores desagradables son debido a la presencia del ácido sulfhídrico y otros compuestos de azufre en los hidrocarburos no saturados (SGM, 2017).

A pesar de su importancia, el estudio del olfato siempre ha estado postergado debido a la dificultad para precisar las cualidades olfativas primarias, volviéndola subjetiva, y su medición ha requerido la aplicación de técnicas sensoriales empíricas (Iglesias-García, 2017). Siendo el olor de suelos una práctica recurrente en los trabajos de remediación, no existe en la literatura referencia ni norma alguna que haga alusión a la percepción de olor a petróleo crudo en la valoración de suelos

remediados como un criterio reconocido, preciso y suficiente para aceptar o rechazar un proyecto de remediación de suelos contaminados. Además del olor muy bajo o ausente de hidrocarburos, existen otros criterios extra-oficiales que se utilizan en muchos sitios remediados: 1) Falta de Iridiscencia de hidrocarburos en charcos en el sitio y 2) Crecimiento de plantas, principalmente pasturas (López-Aguilar et al., 2020).

En particular, en materia de olores, la legislación mexicana solo hace referencia a la contaminación por olores sin darle relevancia. La Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA) establece en su Artículo 5º que es competencia de la federación la regulación de la prevención de la contaminación por olores. Además, en el Artículo 7º establece que es responsabilidad de los estados la prevención y control de la contaminación atmosférica generada por la emisión de olores perjudiciales provenientes de fuentes fijas que funcionen como establecimientos industriales y fuentes móviles que no sean de competencia Federal (LGEEPA, 2018).

La subjetividad de la prueba de olor, ha creado en torno a ella un vacío legal del tema, y de que las investigaciones se enfoquen generalmente a la industria de alimentos, perfumes, vinos y licores. Sin embargo, el tema de olores está despertando interés en otras áreas (Iglesias-García, 2017; Murguía, 2007), especialmente en lo que corresponde a la aceptabilidad de olores desagradables de actividades productivas que generan malestar entre residentes de comunidades en donde evalúan la intensidad y nivel de aceptación (Eltarkawe & Miller, 2018, 2019). Generalmente, las fuentes de los olores desagradables corresponden a las Plantas Tratadoras de Aguas Residuales (Sáenz et al., 2016), rellenos sanitarios (Noguera & Olivero, 2010; Sakawi et al., 2011), operaciones agrícolas y producción ganadera (Carolan, 2008; Coma et al., 2004; Zarra et al., 2009), papeleras, refinerías, fábricas de fertilizantes, centrales térmicas, etc. (Ramos-Rincón et al., 2018).

Las inspecciones mediante el uso de las capacidades olfatorias de un grupo de personas, también llamado panel, y la adaptación de la norma europea UNE-EN 13725 en pruebas de olor, se presentan como herramientas válidas para cuantificar la percepción de olor de una actividad, así como el impacto producido en el entorno (Toro-Gómez, 2013).

La hipótesis del presente estudio fue que la percepción de olor a hidrocarburos en suelos remediados puede ser empleada como un criterio confiable para asegurar una toxicidad en el mismo rango que el nivel umbral y para preservar la fertilidad del suelo. En este trabajo se propuso

determinar mediante pruebas controladas tanto con panelistas urbanos como con panelistas rurales si el olor a hidrocarburos es un criterio adecuado para cumplir con los objetivos de la remediación en suelos contaminados con petróleo crudo de fracción mediana y pesada.

Los resultados de este trabajo aportan la primera referencia de la aplicación de pruebas de percepción olfativa como criterio en los proyectos de restauración de suelos contaminados con petróleo crudo.

## **1.1 OBJETIVOS**

### ***1.1.1 Objetivo general***

Evaluar la percepción olfativa como criterio para discriminar la efectividad de la restauración de suelos contaminados con petróleo crudo mediano y pesado.

### ***1.1.2 Objetivos específicos***

**1.1.2.1** Simular un proceso de contaminación por derrame en tres tipos de suelo no contaminados con diferentes texturas de la zona petrolera del sureste de México del tipo Arenosol, Fluvisol y Gleysol con petróleo crudo mediano y pesado.

**1.1.2.2** Aplicar un proceso de restauración de suelos contaminados con petróleo crudo mediano y pesado simulando biorremediación y atenuación natural.

**1.1.2.3** Relacionar la percepción de olor a petróleo crudo en suelos tratados con los factores de fertilidad, concentración de hidrocarburos y toxicidad aguda en pruebas con poblaciones urbanas y rurales.

## **1.2 HIPÓTESIS**

La percepción de olor a hidrocarburos en suelos remediados puede ser empleada como un criterio confiable para asegurar una toxicidad en el mismo rango que el nivel umbral y para preservar la fertilidad del suelo.

## 1.3 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 1.3.1 *Concepto de Suelo*

El suelo es un cuerpo natural situado en la capa superior de la corteza terrestre, se encuentra constituido de sólidos (minerales y materia orgánica), líquidos (agua envolviendo partículas y el espacio capilar) y gases (aire en el espacio existente en los poros); que ocupa un espacio y cuya característica son: los horizontes o capas que se diferencia del material inicial como consecuencia de las adiciones, pérdidas, transferencias y transformaciones de energía y materia o por la capacidad de soportar el enraizamiento de la vegetación en campo abierto y en sitios transformados por la actividad humana. De hecho, el suelo es un medio extremadamente complejo, variable y vivo. Para los seres humanos, la importancia del suelo radica en el sostenimiento de las plantas que les proporcionan alimentos, fibras, medicamentos y otros recursos necesarios para la vida, y porque además filtra al agua y recicla excretas (Soil Survey Staff, 2014).

### 1.3.2 *Componentes del suelo*

Los componentes del suelo se dividen en cuatro elementos fundamentales:

**1.3.2.1 La Fracción orgánica.** Es conformada por restos vegetales, residuos de origen animal y microbianos con sus productos de su descomposición, que comprenden sustancias húmicas de síntesis y millones de organismos vivos (mesofauna y microfauna) y microorganismos que, junto con las enzimas, son responsables de innumerables procesos bioquímicos y biológicos que tienen lugar en el suelo y determinan su funcionamiento (Porta et al., 2014).

**1.3.2.2 La Fracción inorgánica.** La constituyen las partículas de rocas que se han formado por desgaste bajo la acción de los agentes atmosféricos, comprenden desde coloides diminutos (< 2µm) hasta partículas grandes de grava (> 2mm) y rocas, incluyendo muchos minerales primarios y secundarios. Estos compuestos inorgánicos determinan las propiedades de la mayoría de los suelos y su total adaptabilidad como medio de crecimiento para las plantas (Bohn et al., 1993).

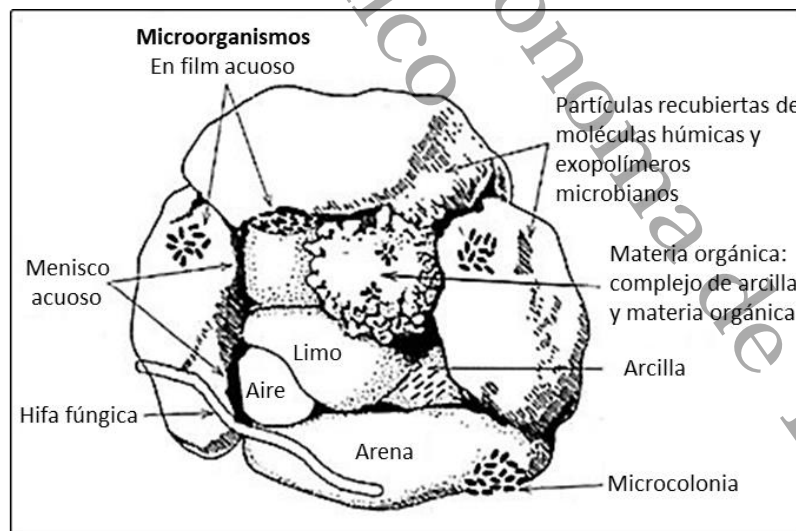
**1.3.2.3 Atmósfera del suelo (aire).** Está constituido principalmente por el oxígeno, el nitrógeno y el dióxido de carbono. Un suelo bien aireado es aquel en el cual los gases están disponibles para el crecimiento de los organismos aeróbicos. La importancia del oxígeno radica en su contribución para el metabolismo de las plantas y la respiración de los microorganismos. Los suelos liberan gases, entre los cuales están O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> como resultado de la descomposición orgánica, N<sub>2</sub> y N<sub>2</sub>O de la desnitrificación (Bohn et al., 1993).

**1.3.2.4 El Agua.** Es el componente líquido con sustancias minerales en disolución. El agua es el medio por el cual los nutrientes son absorbidos por las raíces de las plantas (Bohn et al., 1993).

El volumen ocupado por cada uno de estos componentes en un suelo superficial de textura franca, y en condiciones ideales para el desarrollo de las plantas pueden ser en las siguientes proporciones: material mineral (45 %), materia orgánica (5 %), agua (25 %) y aire (25 %) (Ortiz-Solorio, 2019).

### 1.3.3 Estructura del suelo

La estructura del suelo se define por la forma en que se agrupan las partículas individuales de arena, limo y arcilla. Cuando las partículas individuales se agrupan, toman el aspecto de partículas mayores y se denominan agregados. Las diferentes proporciones de arenas (2 - 0.05 mm diámetro), limos (2 - 50  $\mu\text{m}$  de diámetro), arcillas (inferior a 2  $\mu\text{m}$  de diámetro) y materia orgánica, principalmente humus y derivados, dan lugar a una gran variedad de tipos de suelos. La distribución en el espacio de los componentes minerales y la materia orgánica generan una estructura porosa (Figura 1). Los poros pueden contener agua o aire en cualquiera de sus tres fases: sólida, líquida y gaseosa. Las sales y los nutrientes solubles están presentes en el agua contenida en los poros del suelo, siendo esta, el medio en el cual es posible la actividad metabólica de los microorganismos que lo colonizan. La variación del contenido de agua de un suelo afecta dicha actividad (Viñas-Canals, 2005).



**Figura 1.** Disposición en el espacio de los agregados constituyentes de un suelo. Fuente: Viñas-Canals (2005)

### **1.3.4 Formación de los suelos**

Desde la perspectiva de formación, Porta-López (2014), define que los suelos son unidades naturales multifuncionales producto de la acción conjunta de *factores formadores* que precisan el tipo e intensidad de los procesos edafogénicos. La importancia de los distintos factores varía de unos suelos a otros a lo largo del tiempo. Los principales factores formadores del suelo son:

**1.3.4.1 Roca.** Roca madre, material originario o material parental a partir del cual se forma el suelo.

**1.3.4.2 Clima.** Aporta agua y energía al material originario, con lo que contribuye a que se vayan cambiando sus características (procesos de meteorización).

**1.3.4.3 Organismos vivos.** Actúan sobre la roca o material originario contribuyendo a su disgregación y mezcla.

**1.3.4.4 Geomorfología.** Posición que ocupa el suelo en el paisaje (sitio), permite explicar que las características de los suelos sean diferentes en las distintas formas del terreno.

**1.3.4.5 Tiempo.** La acción de los distintos factores se prolonga a lo largo de cientos o miles de años. El tiempo de formación de un suelo es suficientemente largo, por lo que, a escala humana, el suelo es considerado como un *recurso natural no renovable*, de ahí su importancia de protegerlos.

### **1.3.5 Horizonación**

Desde el punto de vista de sistemas ecológicos, los suelos son sistemas termodinámicos abiertos, ya que ganando o perdiendo determinados componentes, intercambian materia y energía con el exterior, favoreciendo su grado de organización (disminuye su entropía). Se conoce por horizonación al proceso y formación y diferenciación sucesiva de horizontes del suelo, es decir, niveles o capas horizontales más o menos paralelas a la superficie del terreno que se siguen una secuencia vertical, los cuales tienen continuidad lateral siendo específicos para un proceso edafogénico concreto. La existencia de horizontes constituye un indicador para observar un suelo y no un material geológico (Porta et al., 2014).

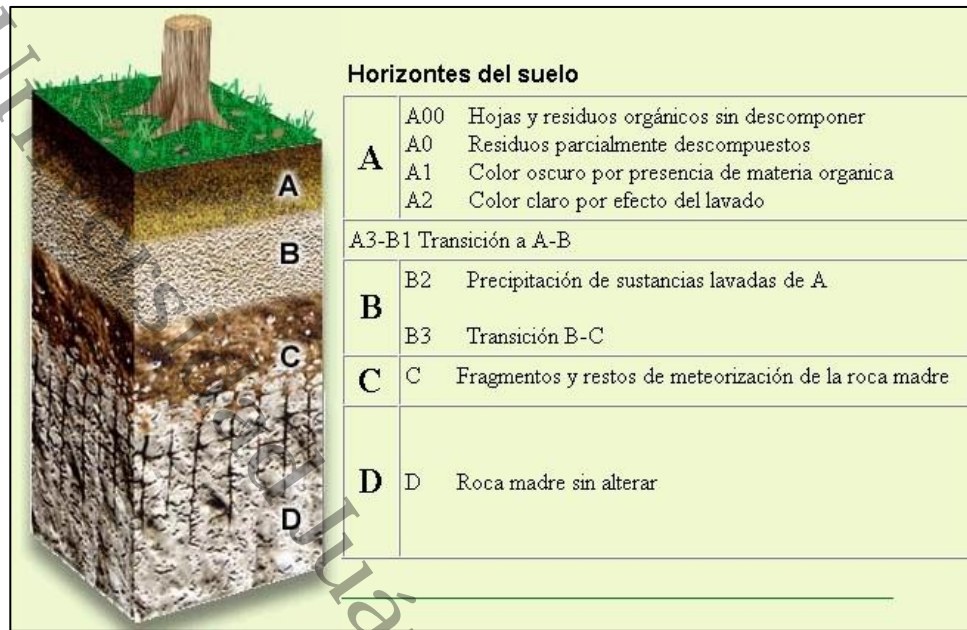


Figura 2. Horizontes del suelo. Fuente: <https://sites.google.com/site/formaciondesuelo/perfil-de-suelo>

### 1.3.6 Fertilidad del suelo

La fertilidad es la capacidad del suelo que permite suministrar los nutrientes esenciales, en las cantidades debidas y en el balance adecuado para el crecimiento y desarrollo de plantas específicas cuando otros factores, tales como la luz, temperatura y condiciones físicas del suelo, son favorables (SEMARNAT, 2002).

### 1.3.7 Propiedades fisicoquímicas

**1.3.7.1 El potencial de hidrógeno (pH).** Es una propiedad química que mide el grado de acidez o alcalinidad de las soluciones acuosas. El pH controla las reacciones químicas y biológicas del suelo. Este parámetro es importante para las plantas porque afecta directamente la disponibilidad de los nutrientes necesarios para el crecimiento eficiente de las plantas. Los suelos muy ácidos o demasiado alcalinos no favorecen la solubilidad de compuestos, restringiendo la presencia de iones de nutrientes esenciales para las plantas (Porta et al., 2014).

**1.3.7.2 La conductividad eléctrica.** Se utiliza para determinar la salinidad (contenido de sales) de suelos. Es una expresión de la capacidad de una solución acuosa para transportar una corriente eléctrica; generalmente, se expresa en  $\text{mmhos cm}^{-1}$  o  $\text{dS m}^{-1}$ . Las soluciones salinas tienen la propiedad de conducir electricidad, hay una relación directa entre la concentración de sales en la solución y la intensidad con la que se puede conducir la corriente. La presencia de sales eleva la



presión osmótica y dificulta e imposibilita, en casos extremos, la absorción de agua por parte de las plantas (Cepeda, 1991). La salinidad afecta los cultivos y por ende la producción. Esto significa que, a mayor CE, mayor es la concentración de sales. Se recomienda que la CE de un sustrato sea baja, en lo posible menor a  $4 \text{ dS m}^{-1}$ . Una CE baja facilita el manejo de la fertilización y se evitan problemas por fitotoxicidad en el cultivo (SEMARNAT, 2002)

**1.3.7.3 La Materia orgánica (M.O.).** Es la sustancia de color oscuro que se encuentra en el seno del suelo y que no es separable de la materia inorgánica del suelo (matriz) ni reconocible su procedencia, sea vegetal o animal (Gallardo-Lancho, 2017). La importancia de la materia orgánica deriva de su intervención en procesos de trascendencia en el comportamiento del suelo y crecimiento de la plantas y organismos del suelo como son: formación y estabilización de los agregados, adsorción e intercambio iónico, suministro de energía y nutrientes, capacidad de retención de humedad, diversos procesos edafogénicos y protección contra la degradación del suelo por erosión. Los aportes de materia orgánica resultan críticos para la fertilidad del suelo a largo plazo (Porta et al., 2014).

**1.3.7.4 Capacidad de campo (CC).** Es la cantidad de agua retenida en el suelo tras el drenaje libre que tiene lugar unos dos a tres días después de una lluvia o riego abundantes. Este parámetro estima un valor aproximado de la disponibilidad del agua en el suelo para el aprovechamiento de las plantas (Porta et al., 2014).

**1.3.7.5 La textura.** Se refiere a la proporción relativa de arena, limo y arcilla presentes en el suelo. Concretamente, la clasificación de texturas se fundamenta en la cantidad de partículas menores de 2 mm de diámetro, fracción conocida como *tierra-fina*. Si las partículas mayores de 2 mm, denominadas como *fracción-gruesa*, si se encuentran en cantidades notables se le adiciona un adjetivo como gravoso o pedregoso. Son en su mayoría químicamente inactivas (Ortiz-Solorio, 2019). Las cantidades de las partículas se expresan en porcentaje de cada fracción referido a la masa de tierra-fina. La capacidad de un suelo para almacenar agua está en función del tamaño y la naturaleza de estas diminutas partículas inorgánicas, condición que favorece todos los procesos de crecimiento y desarrollo de las plantas (Porta et al., 2014).

**1.3.7.6 Capacidad de intercambio catiónico y cationes intercambiables.** Se refiere a la cantidad de cationes que pueden ser intercambiados por unidad de peso de suelo, es una propiedad muy importante relacionada con la nutrición de las plantas y varía en función del tipo de mineral arcilloso (Ortiz-Solorio, 2019). El desarrollo de los procesos físicos, químicos y biológicos en el suelo,

favorecen la acumulación de las sustancias nutritivas indispensables para el crecimiento y desarrollo de las plantas, tales como: nitratos, amonio, fósforo, potasio, calcio, etc. (en forma soluble y asimilable). Sin embargo, si las partículas y coloides del suelo no retienen o absorben los nutrientes liberados, estos pueden ser lavados por las aguas atmosféricas y desechados por lixiviación (Cepeda, 1991).

**1.3.7.7 Densidad aparente (DA).** Es la relación entre una masa de suelo seco y el volumen total que ocupa la muestra inalterada. Se expresa en  $\text{kg m}^{-3}$  de suelo. Orden de magnitud: valor promedio de  $1350 \text{ kg m}^{-3}$  (Porta et al., 2014). El valor de la densidad aparente tiene relación con las características del suelo tales como la textura, el contenido de materia orgánica, la porosidad, la compactación-compresión, la conductividad térmica y la resistencia del suelo a la penetración. Los valores bajos de densidad aparente se asocian con condiciones apropiadas para los cultivos, favoreciendo las características del suelo para las plantas cultivadas y el manejo de cultivos (Narro-Farías, 1994)

**1.3.7.8 Densidad real (DR).** Se refiere a la densidad media de la fase sólida o densidad de las partículas. Se determina obteniendo el peso seco de la muestra del suelo y el volumen ocupado por los sólidos de la muestra. Para un horizonte dado, será prácticamente constante a lo largo del tiempo al ser independiente de la estructura y variar poco la naturaleza de las partículas (Porta et al., 2014).

**1.3.7.9 Porosidad: Espacio vacío.** Está determinado por las características del espacio del suelo no ocupado por sólidos, llamado espacio poroso, en donde se pueden distinguir los macroporos y microporos. Los primeros no retienen el agua contra la fuerza de gravedad propiciando el drenaje y la aireación del suelo, generando el principal espacio para el desarrollo de las raíces. Los segundos son los que retienen agua poniéndolas a disposición de las plantas. La suma de macroporos y microporos se conoce como la porosidad total o espacio poroso del suelo. Las características del espacio poroso, dependen de la textura y la estructura del suelo (Rucks et al., 2004).

**1.3.7.10 Repelencia al agua.** Ocurre cuando una gota de agua colocada sobre la superficie del suelo tarda más de cinco segundos en ser absorbida completamente. Es provocada por la acumulación de compuestos orgánicos hidrofóbicos, causando la reducción de infiltración y la disponibilidad de agua para las plantas, aumenta la escorrentía y la susceptibilidad de erosión; puede perjudicar la estructura del suelo; provoca daños en la producción agropecuaria y forestal.

Posee una alta variabilidad y se expresa con mayor intensidad en condiciones de un suelo seco (Jaramillo, 2006).

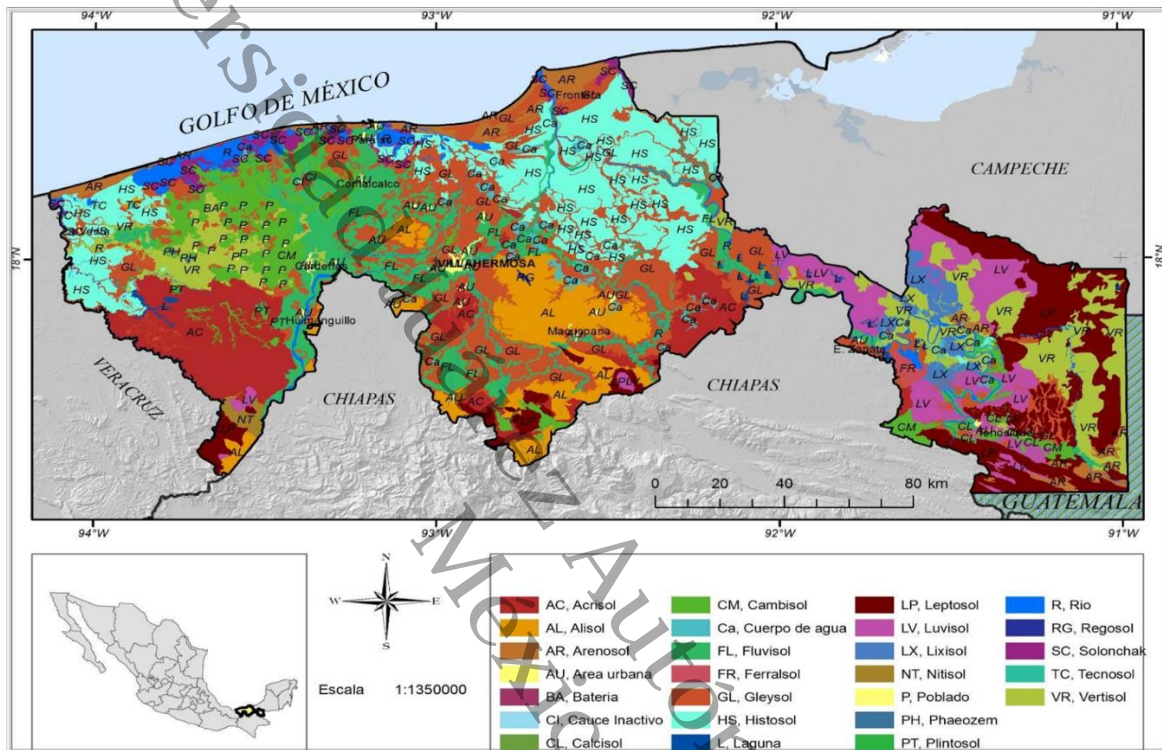
### **1.3.8 Suelos aluviales.**

Para efecto de esta investigación, se hace referencia al sureste mexicano y en específico al estado de Tabasco. Los suelos de la región tabasqueña son de tipo aluvial, los cuales son considerados como suelos poco desarrollados. Cabe mencionar que este estudio se realizó con tres tipos de suelos de esta región: Gleysol, Fluvisol y Arenosol, los cuales se describirán a detalle. Los primeros dos de estos son aluviales. El estado de Tabasco se extiende sobre la provincia fisiográfica mexicana llamada Llanura Costera del Golfo, la mayor parte se extiende sobre la planicie formada por los sedimentos aluviales depositados por inundaciones de la gran cantidad de ríos que atraviesan el estado para desembocar en el Golfo de México (INEGI, 2017). Palma et al (2007), describen las zonas fisiográficas del estado de Tabasco y las clasifica como: Sierra, Calcárea, Lomeríos, Llanura Aluvial, Vega de Río, Llanura de Inundación y Costa.

**1.3.8.1 El aluvión.** Es el resultado del transporte y depósito transitorio o permanente de material detrítico (sedimento de rocas) por una corriente de agua, que puede ser repentina y provocar inundaciones. Puede estar compuesto por arena, grava, arcilla o limo. Estos materiales se almacenan en los canales de las corrientes, en las planicies inundables y en los deltas (Contreras et al., 2015). Los suelos de origen aluvial ubicados en la región tabasqueña del sureste mexicano, son suelos en formación (jóvenes), acumulados en mayor porcentaje sobre la llanura aluvial, estos se clasifican como Gleysoles, Vertisoles y Fluvisoles, aunque se presentan también como mezclas de ellos (asociaciones).

Las características del relieve en la zona aluvial y la existencia de capas de agua que de manera más o menos permanente saturan el suelo, dan lugar a un proceso natural de formación de suelos llamado Gleyzación, que comprende la transformación de hierro férrico a hierro ferroso en condiciones anaeróbicas originadas por saturación de agua, provocando una coloración azul o verde grisácea, que origina el gley (Moreno Ramón & Ibañez Asensio, 2019). Palma et al., (2007) mencionan que en el estado de Tabasco la zona fisiográfica clasificada como Llanura Aluvial comprende principalmente la región de la Chontalpa. Esta área se encuentra en las zonas más bajas del estado, incluso algunas bajo el nivel del mar y presentan serios problemas de impacto ambiental debido a que son áreas de confinamiento de las escorrentías de las tierras más altas, desechos

urbanos, derrames y desechos petroleros. En la época de sequía, la tierra pierde humedad y presenta excelentes condiciones para el desarrollo de cultivos de ciclo corto, en virtud de la gran cantidad de materia orgánica que queda disponible en el horizonte del suelo (Figura 3) (Jiménez-Ramírez, 2013).



**Figura 3.** Grupos de suelos del estado de Tabasco, México, clasificados de acuerdo con la Base Referencial Mundial de Suelo (IUSS et al., 2007). Fuente: Jiménez-Ramírez (2013).

Litológicamente predominan los suelos sobre sedimentos no consolidados de planicies fluviales, palustres, lagunares y costeras que datan del periodo Cuaternario Holoceno; existen también suelos desarrollados sobre rocas sedimentarias detríticas de lutitas, areniscas y conglomerados del Terciario Paleoceno al Terciario Plioceno en las terrazas, lomeríos y montañas, así como en calizas del Cretácico al Terciario Mioceno, que son las más antiguas, en terrazas y montañas kársticas (Zavala-Cruz et al., 2016). El grupo de suelos más abundante en el estado de Tabasco corresponde a los Gleysoles y los Vertisoles, son importantes para las actividades agrícolas y pecuarias, seguidos de los Fluvisoles en áreas de vega de los ríos, y los Luvisoles en la zona de lomeríos (Palma-López et al., 2007). Con respecto al clima, de acuerdo a las estaciones meteorológicas de la zona en el año 2017, es cercana a los 2013.9 mm, observándose una mayor acumulación en el verano, característico del trópico húmedo. La temperatura anual promedio es de 27.2 °C (CONAGUA, 2020).

**1.3.8.2 Suelos Fluvisoles y Gleysoles:** Desde el punto de vista de génesis de suelos (Tabla 1), los factores formadores y uso de suelos Fluvisoles y Gleysoles presentes en el estado de Tabasco son:

**Tabla 1.** Factores formadores y uso de los suelos Fluvisoles y Gleysoles.

TIPO DE SUELO	MATERIAL PARENTAL	GEOMORFOLOGIA Paisaje-Relieve	EDAD GEOLOGICA	CLIMA	SUBUNIDADES	USO o COBERTURA VEGETAL
<b>FLUVISOLES</b> "Vega de Ríos" o "Arenillas"	Sedimentos fluviales o lacustres	Diques naturales en forma paralela a los cauces de los ríos y cauces abandonados.	Período Cuaternario Holoceno	Tropical Húmedo	Fluvisoles Éutricos (FLeu)	El uso que se les da a estos suelos depende de la región donde se encuentren: los Fluvisoles de la región Chontalpa y Centro están ocupados principalmente con cacao, plátano, papaya, cítricos, maracuyá, maíz, frijol, sorgo y pastizales introducidos de alto valor nutritivo.
		Pendientes convexas inferiores al 3 %.			Fluvisoles Eutri-Gléyicos (FLeugl)	
<b>GLEYSOL</b> "Bajiales"	Materiales no consolidados: Sedimentos aluviales y palustres	Ubicados en la región Chontalpa, Centro, Sierra y de los Ríos	Período Cuaternario Holoceno	Tropical Húmedo	Fluvisoles Éutri-Calcáricos (FLeuca)	En la región Sierra están ocupados principalmente por plátano, cacao, plantaciones forestales y pastizales mejorados.
		Zonas bajas, planas y cóncavas.			Fluvisoles Dístricos (FLdy)	
<b>GLEYSOL</b> "Bajiales"	Materiales no consolidados: Sedimentos aluviales y palustres	Pendientes inferiores al 1 %.	Período Cuaternario Holoceno	Tropical Húmedo	Gleysoles Mólicos (GLmo)	Los problemas de anegamiento, manto freático elevado y régimen de humedad ácuico, predisponen a estos suelos para su uso agrícola, recomendándose su uso solo para actividades pecuarias, forestales o de reserva de la vida silvestre.
		Áreas cercanas a las lagunas interiores de los municipios de Huimanguillo, Cárdenas, Paraíso y Centla, así como en partes bajas dispersas en el resto de los municipios.			Gleysoles Úmbricos (GLum)	
					Gleysoles Éútricos (GLEu)	Su uso con cultivos está seriamente restringido, a cultivos tolerantes a los excesos de humedad.
					Gleysoles Dístricos (GLdy)	
					Gleysoles Húmicos (GLhu)	
					Gleysoles Plínticos (GLpl)	

Fuente: Palma-López et al. (2007 y 2017).

En las tablas 2, 3 y 4, se detalla la información de manera más amplia con datos obtenidos de Palma-López et al. (2007 y 2017).

**Tabla 2.** Factores, procesos formadores y características de los Fluvisoles y Gleysoles.

<b>Factores y procesos formadores</b>	
<b>Fluvisoles</b>	<b>Gleysoles</b>
<p>Contienen suelos genéticamente jóvenes en depósitos fluviales.</p> <p>Son suelos que se derivan de sedimentos fluviales o lacustres del Periodo Cuaternario Holoceno.</p> <p>Presentan estratificación de sus horizontes (por los desbordamientos de los ríos y sus afluentes).</p> <p>Mantienen una estratificación en al menos 25 % del volumen de suelo entre la superficie y los 125 cm de espesor.</p> <p>Se distribuyen en diques naturales en forma paralela a los cauces de los ríos y cauces abandonados, con pendientes convexas inferiores al 3 %, localmente se les conoce como "vega de río" o "arenillas".</p> <p>Estos suelos presentan alta permeabilidad, son profundos, de texturas medias o medias sobre gruesas, de poco desarrollo, ricos en nutrimentos y materia orgánica y buen drenaje superficial.</p> <p>Reciben materiales nuevos a intervalos regulares, con excepción de materiales encauzados.</p> <p>Tienen contenido de carbono orgánico que decrecen irregularmente con la profundidad o que se mantienen superiores a 0.20 % a una profundidad de 125 cm.</p> <p>Se han identificado las subunidades Fluvisol éutrico y Fluvisol eutri-gléyico, esta última para separar a los Fluvisoles que presentan características gléyicas debido a un manto freático elevado en alguna época del año, presente o pasada.</p> <p>Los Fluvisoles se distribuyen prácticamente en todo el estado en forma paralela a los cauces de los ríos y arroyos, existiendo un área compacta de estos suelos en la "vega" del río seco (antiguo cauce del río Grijalva), la cual abarca parte de los municipios de Cárdenas, Cunduacán y Comalcalco.</p>	<p>Suelos formados sobre materiales no consolidados (excluyendo materiales de texturas gruesas y depósitos aluviales que tengan propiedades flúvicas).</p> <p>El material parental dominante es derivado de sedimentos aluviales y palustres del Holoceno.</p> <p>Presentan propiedades gléyicas (saturación con agua durante buena parte del año o todo el año y que manifiestan procesos evidentes de reducción o una reducción asociada a la segregación del hierro, dichos procesos se pueden observar en el perfil por la presencia de colores azulosos o verdosos, ya sea como color dominante o como moteado asociado con colores rojizos, amarillentos u ocres), a menos de 50 cm de profundidad.</p> <p>Los procesos redox también pueden ser causados por gases de movimiento ascendente, como el CO<sub>2</sub> o CH<sub>4</sub>.</p> <p>No presentan otros horizontes de diagnóstico que un horizonte A mólico, un horizonte H hístico, un horizonte B cámbico, un horizonte cálcico o un horizonte gypico;</p> <p>No deben de tener las características de diagnóstico de un Vertisol o un Arenosol, ni propiedades sálicas.</p> <p>No deben de tener plintita a menos de 125 cm de profundidad.</p> <p>Son suelos profundos, la mayor parte del año con manto freático somero, alto contenido de materia orgánica y de nutrimentos</p> <p>Ocupan zonas bajas, planas y cóncavas de las planicies fluviales, con pendiente menor a 1%. Localmente se les conoce como "bajiales".</p>

Fuente: Palma-López et al. (2007 y 2017).

Los suelos Fluvisoles y Gleysoles presentan las siguientes subunidades:

**Tabla 3.** Subunidades de los suelos Fluvisoles:

Subunidades	Características
<b>Fluvisoles Éútricos (FLeu)</b>	Los Fluvisoles éútricos son los Fluvisoles que tienen una saturación de bases igual o mayor al 50 %, al menos entre los 20 y 50 cm de profundidad, sin que sean calcáreos a esta profundidad.
	No tienen horizontes sulfúricos, ni materiales sulfídicos dentro de los 125 cm de profundidad, tampoco presentan propiedades sálicas.
	Los Fluvisoles éútricos son suelos con buena permeabilidad, profundos, texturas medias o medias sobre gruesas, de poco desarrollo (presentan únicamente horizontes A y C diferenciados por el grosor del sedimento aluvial)
	Son suficientemente ricos en nutrimentos y materia orgánica, con buena agregación.
<b>Fluvisoles Eútri-Gléyicos (FLeugl)</b>	Muy buena actividad biológica y buen drenaje superficial, por ello se consideran como los mejores suelos del estado.
	Se clasifican según su capacidad de uso como suelos de primera clase (clase I), sin deméritos para su uso agrícola.
	Fluvisoles eútri-gléyicos son los Fluvisoles éútricos que presentan propiedades gléyicas, como moteados grises u ocres, dentro de los 125 cm de profundidad, que se inundan durante alguna época del año, convirtiéndose esto en un factor limitante para cierto tipo de cultivos.
	Estos suelos se ubican en "vegas de río" inundables temporalmente por lo que la circulación del agua internamente, sobre todo en la época de lluvias, se ve reducida y puede presentar algunos fenómenos vinculados con la gleyzación, a esta parte de los Fluvisoles se les clasifica por su capacidad de uso como II/D2, es decir que son suelos de segunda clase por inundación temporal.
<b>Fluvisoles Éútri- Calcáricos (FLeuca)</b>	El uso que se les da a estos suelos depende de la región donde se encuentren: los Fluvisoles de la región Chontalpa y Centro están ocupados principalmente con cacao, plátano, papaya, cítricos, maracuyá, maíz, frijol, sorgo y pastizales introducidos de alto valor nutritivo.
	En la región sierra están ocupados principalmente por plátano, cacao, plantaciones forestales y pastizales mejorados.
	En la región de los Ríos predomina su uso con pastizales mejorados, maíz, melón, sandía y chile.
	Son los fluvisoles que tienen además de un PSB superior a 50.
<b>Fluvisoles Díútricos (FLdy)</b>	Tienen la particularidad de presentar material calcárico, el cual se detecta en campo por la reacción al HCl al 10 % en la mayor parte del perfil.
	Por lo menos entre 20 y 50 cm desde la superficie del suelo.
	Se aplica a material que contiene más del 2 por ciento de carbonato de calcio equivalente.
<b>Fluvisoles Díútricos (FLdy)</b>	Estos suelos se clasifican como de II/D2, limitado desde el punto de vista agrícola únicamente por inundación temporal.
	Son suelos que tienen una saturación con bases (por $\text{NH}_4\text{OAc}$ 1 M) menor de 50 por ciento en por lo menos alguna parte entre 20 y 100 cm desde la superficie del suelo.
<b>Fluvisoles Díútricos (FLdy)</b>	Se localizan en vegas de ríos sobre sedimentos arenosos a franco arenosos.
	Por su capacidad de uso se clasifican como de clase II/S8, limitado únicamente por su baja fertilidad natural.

Fuente: Palma-López et al. (2007).

**Tabla 4.** Subunidades de los suelos Gleysoles:

Subunidades	Características
<b>Gleysoles Mólicos (GLmo)</b>	<p>Son Gleysoles con horizonte A mólico o un horizonte H Hístico y sin propiedades asociadas a las cenizas volcánicas (ándicas) al menos en los primeros 200 cm de profundidad.</p> <p>Se localizan principalmente en las áreas cercanas a las lagunas interiores de los municipios de Huimanguillo, Cárdenas, Paraíso y Centla, así como en partes bajas dispersas en el resto de los municipios.</p> <p>Fisiográficamente ocupan zonas bajas con pendiente plana a ligeramente cóncava inferior a 0.5 %.</p> <p>El material parental de estos suelos es en un primer término derivado de sedimentos aluviales del Cuaternario Reciente, pero estos han sido modificados por el efecto de sedimentación palustre que acompaña a estas zonas bajas. Localmente se les conoce como "popalerías" o "bajiales".</p> <p>Tienen un horizonte A friable y enriquecido por material orgánico en proceso de descomposición, por lo que tienen altos contenidos de nutrimentos y materia orgánica.</p> <p>Presentan texturas francas en la superficie que sobrepasen a texturas arcillo limosas (horizonte C)</p> <p>En ocasiones se pueden presentar texturas arenosas en el fondo del perfil.</p> <p>Son suelos profundos, sin embargo, el manto freático se encuentra cercano a la superficie la mayor parte del año, por lo que la verdadera profundidad de enraizamiento es en realidad menor a la que podía esperarse.</p> <p>Los problemas de anegamiento, manto freático elevado y régimen de humedad ácuico, predisponen a estos suelos para su uso agrícola, recomendándose su uso solo para actividades pecuarias, forestales o de reserva de la vida silvestre.</p>
<b>Gleysoles Úmbricos (GLum)</b>	<p>Los Gleysoles Úmbricos tienen un horizonte superficial parecido al horizonte mólico, grueso, oscuro, rico en materia orgánica sin ser húmico, pero con una saturación de bases menor a 50 %.</p> <p>Por lo general se encuentra asociado con otros suelos, principalmente ácidos en áreas de transición entre lomeríos y la llanura aluvial.</p>
<b>Gleysoles Éútricos (GLEu)</b>	<p>Son los Gleysoles que tienen una saturación de bases igual o superior al 50 %, en al menos entre los 20 y 50 cm de profundidad; sin más horizontes de diagnóstico que un A órico o un B cámbico.</p> <p>no tienen características ándicas dentro de los 200 cm de profundidad.</p> <p>Se distribuyen principalmente en los bajos de las regiones de los Ríos y de la Sierra, en zonas cercanas a los cauces de los ríos y arroyos.</p> <p>Fisiográficamente ocupan superficies cóncavas con pendientes inferiores a 0,5 %.</p> <p>El material parental de estos suelos son los sedimentos aluviales recientes. Localmente se les conoce como "bajiales" o "popales".</p> <p>Los Gleysoles éútricos son muy parecidos a los Gleysoles mólicos, con excepción de que estos no presentan un horizonte A tan enriquecido en materia orgánica y por lo tanto su consistencia no es tan friable como en el caso del horizonte A mólico, esto se debe principalmente a que la vegetación que se encuentra sobre lo Gleysoles éútricos no es tan abundante y aportadora de residuos como en los Gleysoles mólicos.</p> <p>Son suelos profundos con horizontes A y C no muy desarrollados, ricos en nutrimentos, anegados la mayor parte del año y con manto freático elevado.</p>

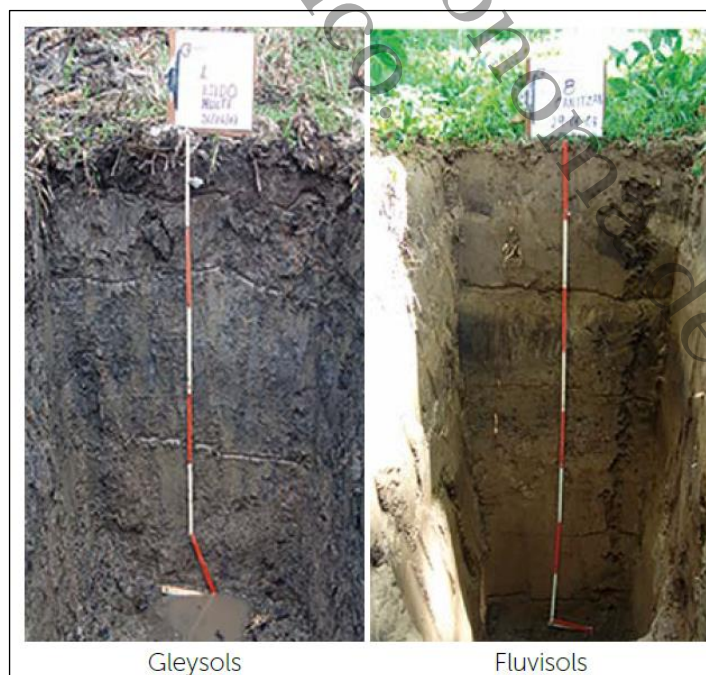
Fuente: Palma-López et al. (2007).



**Tabla 4.** Subunidades de los suelos Gleysoles (continuación):

Subunidades	Características
	<p>Son Gleysoles similares a los Gleysoles éutricos, pero presentan saturación de bases inferior a 50% entre 20 y 50 cm de profundidad, son nutrimentalmente más pobres.</p> <p>Localmente se les conoce como "<i>tierras de bajos</i>", o "<i>bajiales</i>"</p> <p>Se localizan principalmente al sur del municipio de Jonuta y al este de Macuspana. Fisiográficamente ocupan terrenos ligeramente cóncavos con pendientes inferiores al 1 %.</p>
<b>Gleysoles Dístricos (GLdy)</b>	<p>El material parental de estos suelos son sedimentos aluviales del Cuaternario Reciente fuertemente mezclados con sedimentos coluviales de los terrenos originados de areniscas y aluviones del Pleistoceno de los alrededores.</p> <p>La única diferencia de estos suelos con los otros Gleysoles son los menores contenidos nutrimentales, el pH ácido y el período de anegamiento es menor, por lo que se clasifican como IV/D3D4S8.</p> <p>Su uso con cultivos está seriamente restringido, a cultivos tolerantes a los excesos de humedad.</p>
<b>Gleysoles Húmicos (GLhu)</b>	<p>Son suelos que tienen un alto contenido de carbono orgánico de más de 1 por ciento (en peso) en la fracción de tierra fina hasta una profundidad de 50 cm desde la superficie del suelo.</p>
<b>Gleysoles Plínticos (GLpl)</b>	<p>Estos Gleysoles presentan condiciones de aireación durante algunos meses, lo cual permite la formación de plintita no endurecida, formada por estar expuesto a períodos de humedad y secado repetidos con acceso libre de oxígeno.</p> <p>Por su capacidad de uso se clasifican como de V/D3D4S8, debido al anegamiento, manto freático elevado y baja fertilidad.</p>

Fuente: Palma-López et al. (2007).



**Figura 4.** Perfiles de los suelos Gleysoles y Fluvisoles. Fuente: Palma-López et al. (2017)

La zona Costa del estado de Tabasco tiene como característica principal su ubicación geográfica, ya que se extiende a lo largo de la costa del Golfo de México en forma paralela a la línea costera, abarcando una superficie de aproximadamente 80 mil ha (3.2 %) y una extensión de casi 191 km desde Huimanguillo hasta Centla, incluyendo parte de los municipios de Cárdenas y Paraíso. Colinda hacia el sur con la zona fisiográfica de la llanura de inundación y en gran número de sistemas lagunares costeros. La fisiografía de la zona está constituida una serie de bordos de playa y dunas de arenas de forma cóncavo-convexo de material suelto a base de arenas principalmente del Cuaternario Reciente. Los tipos de suelos son arenosos, profundos y de mediana fertilidad, denominados Arenosoles y el tipo de uso de la tierra está basado en el cultivo de coco, solo o asociado con pasto y manglares (Palma-López et al., 2007).

**1.3.8.3 Suelos Arenosoles.** Los Arenosoles son suelos arenosos que están ubicados en la planicie costera de cordones de playa de formación marina del Cuaternario Holoceno, o bien en las zonas de lomerío, formados a partir de rocas areniscas y conglomerados de la Era Cenozoica, localmente se les conoce como “arenales” o “tierras arenosas”. Son suelos que a una profundidad de al menos 100 cm de la superficie presentan una textura más gruesa que franco arenoso, con bajos contenidos nutrimentales, bajo contenido de materia orgánica, alta permeabilidad y muy poca humedad aprovechable para los cultivos. Solo cuentan con un horizonte A ócrico o un E álbito. En Tabasco se pueden encontrar los Arenosoles de la costa (Arenosoles Háplicos, Arenosol Endo-Gléyico) o también los suelos arenosos formados *in situ* a partir de areniscas (Arenosoles Hipolúvicos) (Palma-López et al., 2007; Palma-López et al., 2017).



**Figura 5.** Perfil de los suelos Arenosoles. Fuente: Palma-López et al. (2017)

Los suelos Arenosoles presentan las siguientes subunidades:

**Tabla 5.** Subunidades de los suelos Arenosoles.

Subunidades	Características
<b>Arenosoles Háplicos (ARha)</b>	No tienen ningún otro horizonte de diagnóstico más que un A ócrico; no tienen propiedades ferráticas; no tienen propiedades gléyicas dentro de los 100 cm de profundidad y no son calcáreos.
	El material parental son sedimentos gruesos de origen marino y eólico del Cuaternario Reciente.
<b>Arenosoles Endogleyicos (ARgln)</b>	Son suelos profundos muy arenosos que presentan un horizonte A que descansa directamente sobre uno o varios estratos de horizontes C. Solo se usan con cultivos que tienen capacidad para obtener agua del subsuelo, con enraizamiento muy denso, además de tolerantes a los bajos contenidos nutrimentales.
	Estos Arenosoles son los que tienen propiedades gléyicas entre 50 y 100 cm desde la superficie del suelo. Se pueden localizar en las partes cercanas a los Gleysoles e Histosoles con vegetación de mangle. El uso más extendido es la asociación coco con pastos. En las zonas más cercanas a las costas se utiliza con nopal y uva de playa. Por su capacidad de uso se clasifican como de IV/D3D4S1, sin embargo, en la época de humedad residual es común que se use con maíz y hortalizas de ciclo corto.
<b>Arenosoles Hipolúvicos (ARlvw)</b>	Son los Arenosoles que presentan un aumento en los contenidos de arcilla o una acumulación de arcilla en bandas dentro de los 125 cm de profundidad. No tienen horizonte E álbico de más de 50 cm de espesor; no tienen propiedades gléyicas a menos de 100 cm de profundidad y no son calcáreos. El nombre por el cual se les conoce a estos suelos es el de "arenales" o "tierras arenosas". Se distribuyen principalmente en pequeños manchones en la localidad conocida como el Arenal entre los municipios de Balancán y Tenosique, así como al sur de Tenosique, en las estribaciones de la sierra. Fisiográficamente se ubican en lomeríos con pendientes entre 3-8 %, así como pequeños cerros con pendientes que no superan el 12 %. El material parental de estos suelos está conformado por areniscas de Terciario, así como materiales no consolidados arenosos de formación aluvial del Pleistoceno.
	Son suelos profundos que presentan una serie de horizontes A de más de 70 cm de profundidad con texturas arenosas, después aparece el horizonte Bt enriquecido por arcilla iluvial de texturas medias o arcillo arenosas que puede prolongarse hasta los 150 cm de profundidad, para que posteriormente se presente el horizonte C de texturas arcillosas. Normalmente estos suelos son de colores amarillentos sobre rojizos. El pH es moderadamente ácido en los horizontes A sobre ácidos en la profundidad. Los contenidos de materia orgánica son medianos en la superficie y pobres en la profundidad. Los contenidos nutrimentales son pobres en todo el perfil, la CIC no supera los 6 cmol (+) kg <sup>-1</sup> en los primeros 70 cm de profundidad. La permeabilidad es muy rápida en los primeros horizontes, reduciéndose drásticamente en los horizontes B y C. Otro de los factores de demérito importante en estos suelos es su topografía con pendientes moderadamente fuertes, que aunado a las texturas arenosas y la labranza ha provocado que la mayor parte de estos suelos presenten erosión actual de moderada a fuerte.

Fuente: Palma-López et al. (2007).

## **1.4 EL PETRÓLEO**

### ***1.4.1 Definición de Petróleo***

Del lat. *Petroleum*, aceite de roca. El petróleo es un líquido natural oleaginoso e inflamable, resultado de una mezcla de hidrocarburos presentes en la naturaleza en lechos geológicos continentales o marítimos. Se puede encontrar en estado sólido, líquido o gaseoso. Por efecto de la presión y temperatura, estas fases pueden pasar de una a otra indistintamente. Es un recurso no renovable con apariencia de líquido negro, viscoso y con una composición químicamente compleja, que se encuentra saturando la porosidad de las rocas. Al igual que el petróleo, el gas está compuesto de restos de materia orgánica reducida por descomposición a un estado en que el carbono y el hidrógeno son los principales elementos dentro de su estructura (SGM, 2017).

### ***1.4.2 Fases sólida, líquida y gaseosa***

Los cambios de fase ocurren cuando algunos de los constituyentes del petróleo en su estado sólido a temperatura ambiente, se le aplica calor para elevar ligeramente su temperatura, hará que tomen la forma líquida; si se incrementa el calentamiento hasta el punto de ebullición pasarán a ser gases o vapores. La presión de la tierra que naturalmente se crea dentro de las rocas que los almacena provoca que otros componentes en estado de vapores a temperatura ordinaria se condensen formando líquidos. Por otra parte, si se elimina esta presión manteniendo la temperatura sin cambios provocará la vaporización del líquido nuevamente. El petróleo líquido también puede cambiarse al estado sólido o gaseoso a través de la evaporación, formando gases o vapores en las fracciones más ligeras y volátiles y, solidificándose en las fracciones más pesadas. Las formas sólidas y gaseosas del petróleo son solubles en las formas líquidas, de igual manera, a través de la oxidación del petróleo líquido, este puede solidificarse (SGM, 2017).

### ***1.4.3 Componentes del petróleo***

El petróleo crudo es una mezcla compleja de muchos hidrocarburos, cuya estructura está constituida principalmente de carbono (76 a 87 %) e hidrógeno (13 a 24 %) (Marroquín, 2007). De forma natural se encuentra en estado líquido, conteniendo compuestos de azufre, nitrógeno, oxígeno, níquel, vanadio, arsénico y cromo. Los hidrocarburos son elementos esenciales del petróleo; dentro de sus moléculas contienen solo carbono e hidrógeno y se clasifica en varias familias químicas según su estructura. Todas estas estructuras están basadas en la tetravalencia del carbono (Wauquier, 2004). Así también, todos los petróleos crudos

contienen metales, y estos se encuentran como metaloporfirinas, siendo los más abundantes las porfirinas de níquel y vanadio. Su concentración se incrementa en los hidrocarburos pesados (Marroquín, 2007).

#### **1.4.4 Clasificación de los Hidrocarburos**

Dentro de los compuestos orgánicos, el petróleo crudo es quizás una de las mezclas más complejas, ya que puede contener entre 10,000 y 100,000 compuestos químicos diferentes dependiendo de su tipo u origen (Marshall & Rodgers, 2004). Dentro de esta complejidad del petróleo crudo, los componentes químicos pueden clasificarse en cuatro grupos principales:

**1.4.4.1 Los hidrocarburos saturados.** Se compone de alcanos lineales y ramificados y cicloparafinas; contiene, además, trazas de alquenos (insaturados) que se ven aumentados en los productos de refinación.

**1.4.4.2 Los hidrocarburos aromáticos.** Están constituidos por compuestos aromáticos mono, di- y policíclicos conteniendo cadenas alquílicas y/o cicloparafinas fusionadas, otros derivados sulfurados como el tiofeno, benzotiofeno y dibenzotiofeno. La peculiaridad de esta fracción es que contiene a los compuestos aromáticos policíclicos (HAP), ya que son difíciles de degradar.

**1.4.4.3 Las resinas y compuestos polares (NSO).** La fracción polar es una de las fracciones pesadas del petróleo crudo cuya caracterización por cromatografía de gases es muy difícil (este método generalmente se emplea para el análisis de petróleo crudo), contiene principalmente en su estructura heteroátomos como nitrógeno, azufre y oxígeno, así también, metales como el vanadio, níquel y ácidos nafténicos (piridinas, quinolinas, carbazoles, tiofenos, sulfóxidos y amidas).

**1.4.4.4 Los asfaltenos.** Lo constituyen agregados de poliaromáticos, ácidos nafténicos, fenoles polihídricos, ácidos grasos y metaloparafinas. La fracción de los asfaltenos está relacionada a la de polares con la diferencia que éstos son de más alto peso molecular que depende directamente el tipo de solvente empleado para su precipitación (Díaz-Ramírez et al., 2003; Head et al., 2006).

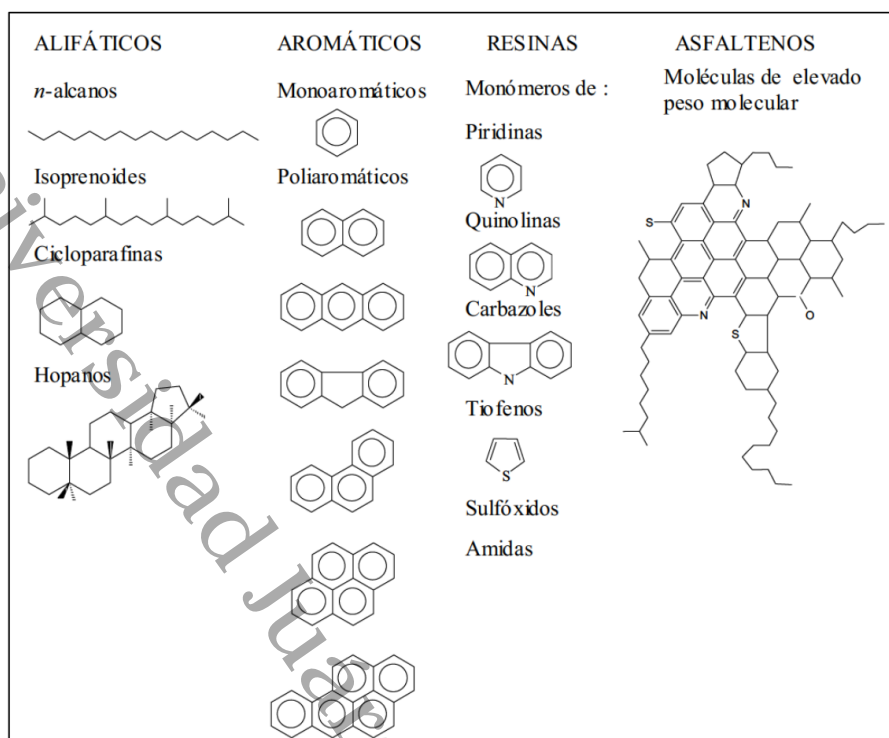


Figura 6. Familia de hidrocarburos en el petróleo crudo. Fuente: Morales-Bautista (2014)

#### 1.4.5 Características físicas del petróleo crudo

Las propiedades de los hidrocarburos tales como su contenido de azufre y su densidad proporcionan información básica respecto de la calidad del crudo; permitiendo diferenciar los crudos en términos de ligero o pesado, de acuerdo al valor de su densidad en grados API. La densidad en grados API se establece a partir de la densidad relativa; sirve de referencia sobre la composición de un crudo, que será más ligero cuanto mayor es su ° API (Lluch Urpí, 2012).

**1.4.5.1 Gravedad API.** Las instituciones y empresas internacionales dedicadas a la industria del petróleo, establecen sus propios criterios para clasificarlos según su normatividad.

En México, para el área de exploración, transporte, extracción y separación (producción y baterías de separación) se emplea como parámetro la viscosidad y la densidad específica y para los complejos procesadores de gas, petroquímica básica y refinería, se emplea como medida de referencia la densidad específica, el % S y la volatilidad. De manera general, la paraestatal Petróleos Mexicanos (PEMEX) clasifica al petróleo de acuerdo a la escala normalizada por el Instituto Americano del Petróleo (American Petroleum Institute) denominada gravedad API (la gravedad específica a 15.60 °C o 60 °F). Los refinadores también lo clasifican como “dulce”, que significa bajo contenido de azufre, o “ácido”, que contiene mayores cantidades de azufre y, por lo tanto, implica más operaciones de refinamiento para cumplir con las especificaciones de los productos refinados.

La fórmula usada para obtener la gravedad API es la siguiente:

$$^{\circ}API = \left( \frac{141.5}{SG} \right) - 131.5$$

Donde: SG= Gravedad específica a 60 °F

El Instituto Americano del Petróleo (API), de acuerdo a su densidad del petróleo, los clasifica de la siguiente manera (Tabla 6):

**Tabla 6.** Clasificación del petróleo según el Instituto Americano del Petróleo

Aceite Crudo	Densidad (g cm <sup>-3</sup> )	Densidad de °API
Extrapesado	> 1	10.23
Pesado	1 – 0.92	10.23 – 22.3
Mediano	0.92 – 0.87	22.3 – 31.1
Ligero	0.87 – 0.83	31.1 - 39
Superligero	< 0.83	> 39

A menor gravedad API, el crudo es más pesado. Los crudos pesados son de color oscuro a negro.

**1.4.5.2 La viscosidad.** Es la resistencia interna que presenta una sustancia a fluir. Una sustancia altamente viscosa no fluye rápidamente, mientras que otras con características más livianas y menos viscosas, como el agua, fluyen fácilmente, atraídos por el efecto de la gravedad. En la medida en que se aumente la temperatura de exposición, la viscosidad de un fluido tiende a decrecer. La viscosidad es una propiedad significativa de las sustancias contaminantes, ya que determina, su percolación en el suelo (Pellini, 2006). Los crudos pesados se caracterizan por ser más viscosos que los crudos ligeros y por tener baja movilidad. Los extrapesados son materiales que se encuentran en estado sólido o semisólidos y son incapaces de fluir a condiciones ambientales (Marroquín, 2007).

#### **1.4.6 Tipos de Petróleo en México**

Para fines de exportación se cuenta con tres tipos de petróleo crudo:

**1.4.6.1 Olmeca.** Superligero ligero con densidad de 39.3 ° API en producción y 0.8 de % S en refinería.

**1.4.6.1 Istmo.** Ligero con densidad de 33.6 ° API en producción y equivalente a 1.3 de % S en refinería.

**1.4.6.3 Maya.** Pesado con densidad de 22 ° API en producción y 3.3 % S en refinería.

#### **1.4.7 Contaminación del suelo con Petróleo Crudo**

Alrededor del mundo, la actividad petrolera en sus distintas fases de explotación y operación es una de las industrias que más impactos ambientales y en la biodiversidad en general provoca a nivel local y global (Bravo, 2007). Cuando se incorpora un contaminante orgánico en un sistema, el efecto que tenga sobre el medio está en función de sus características

físicas y químicas; cuando el contaminante es vertido en el suelo, los parámetros que generalmente se consideran son: la densidad, la permeabilidad, la estructura, el tamaño de las partículas, el contenido de humedad y el porcentaje de materia orgánica, considerando, además, la profundidad del manto freático. Otro de los factores a considerar por su gran influencia es el clima. Este incluye parámetros como la temperatura y las precipitaciones pluviales. En su conjunto, estas variables determinan el tamaño y la distribución tridimensional del frente de contaminación en un sitio específico. Las propiedades físicas del suelo más afectadas por los derrames de compuestos orgánicos son el aumento de la repelencia al agua, pérdida de la estructura del suelo como consecuencia de la ruptura de los agregados y la reducción en el potencial hídrico o capacidad de campo (Morales-Bautista, 2014).

El petróleo crudo incorporado en el medio ambiente transita por una serie de procesos físicos, químicos y biológicos, que se denominan intemperización (*weathering*). En un derrame reciente, los procesos más significativos son la difusión, evaporación, dispersión, emulsificación y disolución. Posteriormente, actúan los procesos a largo plazo que determinarán el destino final del petróleo derramado: fotooxidación, sedimentación y biodegradación (Lozada et al., 2013). Los componentes de bajo peso molecular se volatilizan fácilmente en promedio de 10 % para el crudo pesado y más del 75 % para los productos refinados (gasolina) y crudo ligero. Cabe hacer notar que menos del 5 % de los compuestos del crudo o productos refinados (principalmente aromáticos de bajo peso molecular) es soluble en agua. A través de la fotooxidación, los hidrocarburos expuestos a la luz solar pueden ser oxidados a compuestos polares (Albers, 2003).

Un derrame de petróleo en el suelo, modifica su estructura en función de la cantidad de contaminante vertido, por lo que es conveniente considerar las características y propiedades del hidrocarburo (fracción y viscosidad) en la evaluación de la contaminación. La materia orgánica y los tipos de arcilla presentes en el suelo desempeñan una función importante en la migración vertical u horizontal del contaminante, y esto permite conocer cuáles son los organismos vivos expuestos a la toxicidad (Adams et al., 2008c; Zavala-Cruz et al., 2005). Por su alta viscosidad, el crudo pesado y algunos combustibles tienden a desplazarse horizontalmente; en caso contrario, la gasolina y aceites de baja viscosidad penetran fácilmente en la superficie del suelo (Atlas & Bartha, 2002).

Los suelos poseen la capacidad de responder de diferente manera a la acumulación del contaminante. Las arcillas y el contenido de materia orgánica en el suelo favorecen la inmovilización de compuestos del petróleo, tales como los alifáticos e hidrocarburos aromáticos



resultantes de la combustión incompleta del petróleo, evitando su propagación en la superficie o infiltración en el perfil del suelo (Gutiérrez & Zavala-Cruz, 2002).

Adams et al., (2008) exponen que, en cuanto a la persistencia de sustancias tóxicas, la estructura de las arcillas es el componente del suelo esencial para su control; la persistencia aumenta si las partículas son más pequeñas ya que aportan una gran área superficial para la absorción de los productos químicos. Los derrames de petróleo generan problemas a la fertilidad del suelo. El potencial hídrico tiene una relación directa con la repelencia al agua. La repelencia al agua se manifiesta con niveles más altos en las superficies contaminadas con hidrocarburos de alto peso molecular (Jaramillo, 2006). Los hidrocarburos del petróleo más biodegradables son los alcanos. Sin embargo, los alcanos con número de carbono C5 y C10 al presentar altas concentraciones, como solventes rompen la membrana lipídica de las bacterias, inhibiendo la biodegradación. Estos alcanos iniciales son muy volátiles y bajo condiciones aerobias pueden ser removidas mediante arrastre por aire. En el caso de los hidrocarburos poliaromáticos (HAP's), la biodegradabilidad tiende a decrecer conforme se incrementa el número de anillos en su estructura (Eweis et al., 1998).

Los hidrocarburos aromáticos se consideran tóxicos, debido a su casi nula solubilidad en el agua, condición que permite prolongar su presencia en el ambiente complicando su biodegradación. Los hidrocarburos intemperizados son el resultado de derrames antiguos. En sitios remediados presentan baja toxicidad, pero alteran las propiedades fisicoquímicas del suelo, afectando el rendimiento de forrajes y cultivos. Los hidrocarburos asfálticos afectan al suelo cuando aglomeran las partículas finas en partículas más gruesas, provocando la reducción de la capacidad de retener humedad y nutrientes catiónicos en el suelo. Además, puede provocar la compactación del suelo, reduciendo la capacidad de penetración de las raíces y la porosidad del suelo, trayendo como consecuencias anegamiento, escurrimiento y erosión del suelo (Adams et al., 2008c).

#### ***1.4.8 Técnicas de saneamiento de suelos contaminados con hidrocarburos***

Con el fin de evitar la dispersión de los contaminantes y reducir los efectos negativos que producen en el suelo, se han desarrollado técnicas de remediación, también conocidas como técnicas de saneamiento o restauración. El término tecnología de tratamiento implica cualquier operación unitaria o serie de operaciones unitarias que alteran la composición de una sustancia peligrosa o contaminante a través de acciones físicas, químicas o biológicas de manera que reduzcan la toxicidad, movilidad o volumen del contaminante. Las tecnologías de remediación pueden clasificarse de diferentes maneras, con base en los siguientes principios: estrategia de

remediación, lugar en que se realiza el proceso de remediación y tipo de tratamiento (Van Deuren et al., 1997; Volke-Sepúlveda & Velasco Trejo, 2002).

#### **1.4.9 Estrategia de remediación**

Son tres estrategias básicas que pueden usarse separadas o en conjunto, para remediar la mayoría de los sitios contaminados (Volke-Sepúlveda & Velasco Trejo, 2002):

**1.4.9.1 Destrucción o modificación.** Este tipo de tecnologías busca alterar la estructura química del contaminante.

**1.4.9.2 Extracción o separación.** Los contaminantes se extraen y/o separan del medio contaminado, aprovechando sus propiedades físicas o químicas (por ejemplo, volatilidad, solubilidad o carga eléctrica).

**1.4.9.3 Aislamiento o inmovilización.** Los contaminantes son estabilizados, solidificados o contenidos con el uso de métodos físicos o químicos.

#### **1.4.10 Lugar de realización del proceso de remediación**

En general, se distinguen dos tipos de tecnología: *in situ*, es decir, se realizan en el mismo sitio en donde se encuentra la contaminación y, *ex situ*, por lo que se requiere de excavación, dragado o cualquier otro proceso para remover el suelo contaminado antes de su tratamiento. Cabe mencionar que actualmente en la SEMARNAT, administrativamente se distinguen tres tipos, de acuerdo a la solicitud de autorización para el tratamiento de suelos y/o materiales semejantes a suelos contaminados (SEMARNAT, 2019):

**1.4.10.1 Tratamiento *in situ*.** Se realiza en el predio que los contiene sin ser removidos y trasladados.

**1.4.10.2 Tratamiento *on site*.** Se realiza sobre un área adyacente al sitio contaminado o sobre un área dentro del sitio contaminado, previa remoción y transferencia de los suelos o materiales contaminados.

**1.4.10.3 Tratamiento *off site*.** Cuando el tratamiento se realiza fuera del sitio contaminado en instalaciones fijas autorizadas, previa remoción y transferencia de los suelos o materiales contaminados.

#### **1.4.11 Tipo de tratamiento**

Esta clasificación se basa en el principio de la tecnología de remediación:

**1.4.11.1 Tratamientos térmicos.** Utilizan calor para incrementar la volatilización, quemar, descomponer o fundir los contaminantes.

**1.4.11.2 Tratamientos biológicos (biorremediación).** Utilizan las actividades metabólicas de ciertos organismos (bacterias, hongos, levaduras, plantas) para degradar, transformar o remover los contaminantes a productos metabólicos inocuos.

**1.4.11.3 Tratamientos fisicoquímicos.** Este tipo de tratamientos, utiliza las propiedades físicas y/o químicas de los contaminantes o del medio contaminado para eliminar, separar o contener la contaminación. El tratamiento físico se basa en la remoción del contaminante a través de medios físicos (agitación y vibración); mientras que el tratamiento químico se requiere de la aplicación de un agente químico para promover la extracción del contaminante y el tratamiento biológico emplea organismos vivos para biodegradar el contaminante (Maceiras, 2016).

En la Tabla 7 se muestran algunas de las técnicas de remediación de suelos de tipo biológico, fisicoquímico y térmico más comúnmente utilizadas en el mundo (Leyva-Cardoso 2006).

**Tabla 7.** Técnicas de remediación de suelos.

Tipo biológico	Tipo fisicoquímico	Tipo térmico
Atenuación natural (1)	Lavado de suelo (1,2)	Desorción térmica (1,2)
Bioestimulación (1,2)	Oxidación química (1,2)	Pirólisis (2)
Bioaumentación (1,2)	Extracción de vapores (1)	Incineración (1,2)
Bioventeo (1)	Solidificación-estabilización (1,2)	Vitrificación (1,2)
Biolabranza (2)	Electrocínética (1)	
Composteo (2)		
Biorreactores (2)		
Fitorremediación (1,2)		

1: *in situ*, 2: *ex situ* Fuente: Leyva-Cardoso (2006)

Existe información en donde se documenta las técnicas de remediación de suelos contaminados con petróleo crudo, por ejemplo, la biorremediación (Rodríguez-Campos et al., 2019), la extracción de vapor (Nematollahi et al., 2018), el lavado del suelo (Befkadu & Quanyuan, 2018), el tratamiento térmico (Vidonish et al., 2016) y la oxidación química (Ola et al., 2017). Generalmente las acciones recurrentes en un sitio contaminado es la excavación del material y su deposición en rellenos sanitarios, o bien se procede a su traslado para su incineración, sin embargo, en esta última acción, no solo se destruyen los contaminantes, sino que también provocan una forma de contaminación secundaria, a través de la formación de compuestos orgánicos volátiles (COV) (Adipah, 2019). Por lo tanto, cuando ocurre un derrame, dentro de las acciones a tomar, es muy importante realizar una correcta caracterización tanto del contaminante como del tipo de suelo, para que de esa manera se pueda elegir la técnica de remediación más adecuada (Khan et al., 2004). Al mismo tiempo, se debe considerar la toma

muestras de suelos testigos para que al final del tratamiento se logren restablecer las condiciones del suelo para que puede ser aprovechado con la misma utilidad, garantizando sus propiedades físicas (materia orgánica, densidad, textura, porosidad, capacidad de campo) y químicas (pH, capacidad de intercambio catiónico, conductividad eléctrica) para su reactivación a su vocación original (LGEEPA, 2018).

Sin embargo, se debe tener en cuenta que *ninguna tecnología de remediación es considerada la mejor solución* para la remediación de suelos contaminados con petróleo (Lim et al., 2016). Es importante considerar el análisis de los parámetros que son determinantes en la selección de una tecnología de remediación de suelos (Khan et al., 2004).

**Tabla 8.** Parámetros que son determinantes en la selección de una tecnología de remediación de suelos.

PARAMETROS	
<b>Parámetros fisicoquímicos</b>	
pH	En función del grado de contaminación, es la importancia del control de parámetros fisicoquímicos, lo cual influye en la capacidad de biodegradación de los hidrocarburos por los microorganismos nativos en el suelo y el grado de mineralización de los compuestos orgánicos.
Oxígeno disuelto ( $\text{mg L}^{-1}$ )	
Nutrientes C:N:P	
Materia orgánica (%)	
Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	
Humedad relativa (%)	
<b>Parámetros hidrológicos</b>	
Permeabilidad del suelo ( $\text{cm s}^{-1}$ )	Estos parámetros afectan la velocidad del transporte de hidrocarburos a través del suelo o bien influyen en la acumulación de la superficie.
Densidad del suelo ( $\text{g cm}^{-3}$ )	
Conductividad hidráulica ( $\text{cm s}^{-1}$ )	
Porosidad	
Textura	
Tamaño de partícula (mm)	
<b>Propiedades físicas del contaminante</b>	
Solubilidad ( $\text{g L}^{-1}$ )	Las propiedades físicas del contaminante afectan el movimiento y transporte de estos en el medio físico y, en consecuencia, la capacidad de degradación.
Presión de vapor (mm Hg)	
Constante de Henry ( $\text{atm}\cdot\text{m}^3 \text{mol}^{-1}$ )	
Viscosidad (cP)	
<b>Principales parámetros de operación</b>	
Velocidad de flujo del aire ( $\text{m}^3 \text{min}^{-1}$ )	El control de parámetros de operación de una tecnología es muy importante, ya que de ello depende el éxito de una tecnología.
Inyección de Oxígeno ( $\text{kg O}_2 \text{kg}^{-1}$ )	
UFC (Unidades Formadoras de Colonia)	
$\text{mL}^{-1}$	

Fuente: Khan et al., (2004)

#### 1.4.12 Tratamiento de hidrocarburos intemperizados

Los hidrocarburos intemperizados son los hidrocarburos residuales presentes en el suelo o sedimento, una vez que han sufrido los procesos de intemperización como: volatilización, fotooxidación, emulsificación, sedimentación y biodegradación. Están constituidos por cadenas con más de 25 carbonos, después de décadas de intemperización se convierten en contaminantes altamente persistentes en el medio ambiente, tienen baja o nula

biodisponibilidad debido a su alta hidrofobicidad y contenido de compuestos heterocíclicos, los cuales contienen elementos inorgánicos como N, S, O y Cl, Va, Ni entre otros.

Estos incrementan la toxicidad en el suelo e inhiben la degradación de los compuestos aún más simples, como hidrocarburos aromáticos y cadenas lineales menores a 18 carbonos, sin embargo, existe poca información sobre tales mecanismos de inhibición.

Los hidrocarburos intemperizados afectan el crecimiento de plantas, debido a la disminución de la fertilidad del suelo. Esto ocasiona una ruta de riesgo cuando el ganado ingiere partículas de suelo adheridas al pasto, al respecto se reporta que concentraciones mayores a 50,000 mg HTP kg<sup>-1</sup> suelo representa un riesgo para plantas, organismos vivos y bacterias, otros estudios reportan que la presencia de hidrocarburos intemperizados en concentraciones de 2,300 mg kg<sup>-1</sup> ocasiona la reducción de la altura de plantas de zonas pantanosas (Rivera-Cruz & Trujillo-Narcía, 2004).

Dentro de las tecnologías recomendadas para tratar hidrocarburos intemperizados se encuentran (Volke-Sepúlveda & Velasco Trejo, 2002):

**1.4.12.1 Biorremediación.** Con estrategias: *bioestimulación* (se sustenta en la introducción de nutrientes nitrógeno y fósforo), en particular los fertilizantes orgánicos e inorgánicos, con el fin de promover el crecimiento y estimular a los microorganismos autóctonos con capacidad de degradar los contaminantes de interés) y *bioaumentación* (es la adición de cepas o consorcios de microorganismos nativos y no-nativos para eliminar su contaminación).

**1.4.12.2 Tratamiento químico de desorción alcalina.** Esta tecnología de remediación para un suelo repelente al agua contaminado con hidrocarburos, consiste en la remoción de hidrocarburos por intercambio catiónico utilizando suspensiones o soluciones alcalinas (de Ca(OH)<sub>2</sub> o NaOH), para lograr que las cargas positivas de la materia orgánica en el suelo sean sustituidas por cationes minerales. El proceso de desorción alcalina se basa en el hecho de que las capas de los hidrocarburos están unidas a la materia orgánica a través de puentes de hidrógeno y fuerzas de Van Der Waals, y esta a su vez, está unida a la superficie del suelo mediante un enlace iónico. Posteriormente, se reemplaza la materia orgánica por la adición de una enmienda orgánica al suelo como la cachaza de caña de azúcar u otros desechos agrícolas (Adams et al., 2016)

**1.4.12.3 Fitorremediación.** Se sustenta en el uso de plantas superiores y de microorganismos que viven en la zona radical de las plantas.

**1.4.12.4 Ácidos húmicos.** Empleando surfactantes naturales no tóxicos capaces de remover HTP como lo hace un surfactante sintético.

**1.4.12.5 Estabilización-Solidificación.** Los contaminantes son atrapados físicamente dentro de una masa estabilizada (solidificación), o son inducidas reacciones químicas entre el agente estabilizante y los contaminantes para reducir su movilidad (estabilización).

**1.4.12.6 Desorción Térmica.** Consisten en calentar (90 a 540 °C) el suelo contaminado con contaminantes orgánicos, con el fin de vaporizarlos y por consiguiente separarlos del suelo.

**1.4.12.7 Pirólisis.** Es la descomposición química de materiales orgánicos inducida por calor en ausencia de oxígeno. El proceso normalmente se realiza a presión y temperaturas de operación mayores a 430 °C.

**1.4.12.8 Incineración.** Se utilizan altas temperaturas de operación que van desde los 870 a los 1200 °C, con la finalidad de volatilizar y quemar compuestos orgánicos y halogenados en presencia de oxígeno.

**1.4.12.9 Vitrificación.** Utiliza una corriente eléctrica para fundir los suelos contaminados con temperaturas que van de 1600 a 2000 °C.

### **1.5.1 Análisis Sensorial**

Se entiende por **Análisis Sensorial** a la disciplina científica dedicada al estudio y evaluación de las propiedades organolépticas de los productos a través de los sentidos del ser humano (Espinosa-Manfugás, 2014), es decir, se utiliza para evocar, medir, analizar e interpretar las reacciones a aquellas características de alimentos y otras sustancias, que son percibidas por los sentidos de la vista, olfato, gusto, tacto y oído (Echeverría et al., 2008). Esta disciplina utiliza como instrumento científico a panelistas humanos bajo condiciones controladas, con diseños experimentales, métodos de prueba y análisis estadísticos (Anzaldúa-Morales, 1994; Schutz, 1971). El análisis sensorial tiene múltiples aplicaciones, entre ellas el desarrollo y mejoramiento de productos, control de calidad, estudios sobre almacenamiento y desarrollo de procesos.

Históricamente, por no considerarse lo suficientemente objetivos, los métodos sensoriales han sido menospreciados por la comunidad científica, dado que, a diferencia de otras técnicas analíticas, el instrumento a través del cual se obtienen resultados es el panel de evaluadores. Hasta mediados del siglo XX, la mayoría de los científicos solo daban valor a los métodos instrumentales, por lo que las investigaciones en este campo estaban orientadas a los métodos objetivos que permitieran realizar determinaciones cuantitativas. La integración simultánea de las múltiples señales (aspecto, olor, gusto, textura, sonido, etc.) da lugar a complejas respuestas sensoriales, las cuales son asociadas por el evaluador o juez con su experiencia pasada, la influencia de los aspectos contextuales y su anticipación a la emisión de su juicio (Zamora-Utset, 2007). Los diferentes grados de sensibilidad del sistema sensorial es el resultado de factores hereditarios, fisiológicos, culturales, además de la edad y la salud. En una

evaluación sensorial, las respuestas de los jueces también dependen de la inteligencia, la memoria, la atención y las experiencias y hábitos de las personas, así como de las condiciones del entorno en el cual se reciba una sensación, como los ruidos, los olores, la temperatura ambiente y la comodidad (Puerta-Quintero, 2009).

### **1.5.2 El olfato**

Los seres humanos a través del olfato disponen de unos 1,000 receptores conocidos con la capacidad de distinguir unos 10,000 olores distintos, sin embargo, se dan casos en el que el mecanismo olfativo en algunos individuos no funciona correctamente y se produce una disminución o ausencia total de la capacidad de oler, conocido como anosmia. El funcionamiento del sentido del olfato abarca todo el sistema nasal. En el parte interior de la nariz y en la zona facial próxima a esta, se ubican regiones cavernosas cubiertas de una mucosa pituitaria, conteniendo células y terminales nerviosas que reconocen los diversos olores y mediante el nervio olfativo transmiten la sensación olfatoria hasta el cerebro (Figura 7) (Colorado-Peralta & Rivera, 2014; Espinosa-Manfugás, 2014).

Para definir el olor la técnica consiste en oler y anotar rápidamente la (o las) familia (s) de olores en las que se ha pensado inmediatamente o en las que se han clasificado los primeros estímulos percibidos. Para lograr que los resultados de la evaluación sensorial sean objetivos es indispensable que las pruebas sean controladas por: a) Validación de pruebas, b) Documentación de la prueba, c) Entrenamiento y comprobación del entrenamiento, d) Medios de ensayo adecuados, e) Planificación, f) Organización y operación de los medios para realizar el ensayo, g) Mantenimiento y calibración del equipamiento, h) Procedimientos para la selección y entrenamiento de los evaluadores sensoriales, i) Procedimientos de Control de Calidad actualizados, j) Monitoreo actualizado del funcionamiento del evaluador sensorial individual y del panel, k) Uso de materiales de referencia y entrenamiento apropiado, l) Procedimiento de chequeo de datos y ll) Registros de la ejecución de la prueba (Zamora-Utset, 2007).

### **1.5.3 El olor**

El olor es la sensación resultante provocada por la percepción de las partículas volátiles por medio de la nariz. Las sustancias volátiles atraviesan la mucosa pituitaria y entran en contacto con las células que reconocen los olores y con las terminaciones nerviosas que los transmiten. Al igual que ocurre con otros sentidos, varios factores psicológicos pueden desempeñar cierto papel en la percepción de los mismos (Figura 7). Los olores pueden ser aromas agradables (los olores de algunas flores, maderas y cítricos) o desagradables (olores producidos por algunos microorganismos) (Alonso-Giner, 2011; Colorado-Peralta & Rivera, 2014).



**Figura 7.** Funcionamiento del sentido del olfato. Fuente: (Colorado-Peralta & Rivera, 2014)

### 1.5.4 La percepción

La percepción se define como “la interpretación de la sensación, es decir la toma de conciencia sensorial”. La sensación se puede medir únicamente por métodos psicológicos y los estímulos por métodos físicos o químicos (Sancho et al., 1999), o bien, “La capacidad de la mente para atribuir información sensorial a un objeto externo a medida que la produce”. La percepción de cualquier estímulo ya sea físico o químico, se debe principalmente a la relación de la información recibida por los sentidos, denominados también como órganos receptores periféricos, los cuales codifican la información y dan respuesta o sensación, de acuerdo a la intensidad, duración y calidad del estímulo, percibiéndose su aceptación o rechazo (Carpenter et al., 2002).

### 1.5.5 Procedimiento de Evaluación sensorial

La evaluación sensorial es aquella que usa técnicas basadas en la fisiología y psicología de la percepción. Para efecto de llevar a cabo un análisis o evaluación sensorial se emplea como herramienta básica o principal a personas, es decir, el instrumento de medición es el ser humano. El ser humano cuenta con capacidades sensitivas y sensibles, características que una máquina no posee para dar respuestas en una evaluación efectiva. Para garantizar resultados



objetivos, es importante que las evaluaciones sensoriales estén apoyadas con una fundamentación científica (Torricella & Huerta, 2008). Un buen diseño y una adecuada conformación del panel evaluador conlleva a cumplir ciertos requisitos, de acuerdo a las recomendaciones y lineamientos establecidos en la Norma ISO 8586:1:2014 (Guía general para la selección, capacitación y monitoreo de evaluadores seleccionados y evaluadores sensoriales expertos)(ISO, 2014).

### ***1.5.6 Tipos de Pruebas sensoriales***

Las pruebas sensoriales comprenden varias evaluaciones según sea la finalidad para la que se realice. Existen cuatro tipos de pruebas sensoriales: las afectivas, discriminatorias o discriminativas, descriptivas y cualitativas; en las que se busca conformar un panel de análisis sensorial.

**1.5.6.1 Las pruebas afectivas.** Son aquellas en la que el juez muestra su reacción subjetiva con respecto al producto, indicando si le gusta o le disgusta, si lo acepta o lo rechaza, si le agrada o si prefiere a otro. Entre las pruebas afectivas están las de medición del grado de satisfacción y las de aceptación. Por lo general se realizan con paneles inexpertos o con solamente consumidores (Cárdenas-Mazón et al., 2018). Este tipo de prueba por lo tanto exige una escala de tipo hedónico o también conocido como de Likert, que consiste en presentar al juez una lista ordenada de posibles respuestas que refleja distintos grados de satisfacción, teniendo en la parte media un punto neutro que las equilibra. El panelista emite su opinión mediante una respuesta en la escala que representa una categoría apropiada respecto del producto, que va desde “me gusta muchísimo” hasta “me disgusta muchísimo”. Las respuestas pueden estar representadas por números enteros, etiquetas verbales o figuras (para estudios con niños) y está permitido asignar la misma categoría a más de una muestra. Por su efectividad estas pruebas son aplicadas con frecuencia en el diseño de productos (Watts et al., 1992).

**1.5.6.2 Las pruebas discriminatorias.** Son aquellas que buscan establecer si hay diferencia o no entre dos o más muestras sin necesidad de conocer la sensación subjetiva causada en una persona. En algunos casos busca fijar la magnitud o importancia de esa diferencia. Entre las más utilizadas se encuentran las pruebas de comparación apareada simple, triangular, duo-trío, comparaciones múltiples y de ordenamiento.

**1.5.6.3 Las pruebas descriptivas.** En estas pruebas el juez determina las características sensoriales que definen los atributos individuales de un producto, de este modo cuantifican las diferencias existentes entre varios productos. Posteriormente, a través de estas pruebas se

jerarquiza la aparición de cada atributo, grado de intensidad de cada uno, aspectos residuales y amplitud o impresión general.

**1.5.6.4 Las pruebas cualitativas.** Se utilizan para describir analíticamente las características sensoriales del producto y para establecer la calidad del mismo con respecto a un reglamento (Cárdenas-Mazón et al., 2018; Echeverría et al., 2008)..

**Tabla 9.** Diversos tipos de pruebas de evaluación sensorial

PRUEBAS	TEST	APLICACIONES
<b>Afectivas</b>	Escala hedónica Aceptación y preferencia	Estudios de preferencia Estudios de aceptación
<b>Discriminativas</b>	Comparación pareada Triangular Dúo-Trío Ordenamiento	Entrenamiento de jueces Efecto de las condiciones en los atributos sensoriales
<b>Descriptivas</b>	Escalas no estructuradas Escalas de intervalo Escalas estándar Calificación proporcional de los grados de calidad	Relación entre estímulo-respuesta Validez de los métodos instrumentales Selección de jueces Definición de los límites
<b>Cualitativas</b>	Hoja de perfil QDA (Análisis Descriptivo Cuantitativo)	Descripción de un producto Comparación de productos Calidad comercial

Fuente: Echeverría et al. (2008)

### 1.5.7 Tipos de jueces

En las evaluaciones sensoriales se distinguen dos tipos de jueces:

**1.5.7.1 Juez analítico.** El Juez analítico es el individuo que destaca por su sensibilidad sensorial específica dentro de un grupo de candidatos para evaluar uno o varios productos.

**1.5.7.1 Juez afectivo.** El Juez afectivo es el individuo escogido al azar, no pasa por un proceso de selección ni es adiestrado, se le considera representativo de la población a la cual va dirigido el producto que se evalúa.

### 1.5.8 Número de jueces

En el caso de evaluaciones sensoriales con jueces afectivos, aleatorios, no entrenados, es conveniente conformar un panel tomados al azar que reúna determinadas características. En referencia al tamaño del panel se necesitan como mínimo 10 personas para que los resultados sean significativos, buscando que, de preferencia, conozcan o estén habituados a las características del producto o sustancia evaluada (Surco-Almendras & Alvarado-Kirigin, 2011).

El número de jueces requerido para realizar una determinada prueba de análisis sensorial depende de varios factores, entre los que se encuentran: a) El objetivo de la prueba, b) El procedimiento a seguir y el entrenamiento que ello implica, c) La variabilidad del producto y la repetitividad y coherencia de los resultados de los jueces.

Si el panel es demasiado pequeño, los resultados pueden ser excesivamente dependientes de los juicios particulares. Sin embargo, paneles sensibles, de pequeño tamaño y muy entrenados, ofrecen una mayor capacidad de percepción y resultados más uniformes que los de mayor tamaño, con un menor entrenamiento y por consiguiente menos sensibles para la prueba. En general, cuanto mayor es la variabilidad intrínseca del producto, mayor debe ser el tamaño del panel requerido para conseguir un determinado nivel objetivo con significación estadística. Para asegurar que en el momento de realizar una determinada prueba existen siempre jueces disponibles, se recomienda que el director del panel cuente con una reserva de jueces superior, en un 50% como mínimo, al número requerido para realizar este tipo de pruebas (Carpenter et al., 2002; ISO, 2007).

#### ***1.5.9 Requisitos que deben cumplir los jueces***

Los candidatos a jueces deben cumplir con los siguientes requisitos: a) Interés y motivación, b) Actitud hacia los alimentos, c) Conocimientos y aptitudes para interpretar y expresar sus percepciones sensoriales, d) Buena salud, e) Aptitud para comunicar y describir las sensaciones percibidas y f) Disponibilidad para asistir tanto a los entrenamientos y evaluaciones posteriores (International Standard ISO 8586:2012) (ISO, 2012).

#### ***1.5.10 Escalas de medición***

Las escalas de medición son empleadas en la cuantificación de los resultados de las pruebas sensoriales. Para fines del manejo y análisis de la información existen diferentes tipos de escalas: nominal, ordinal, de intervalo y racional. Se selecciona el tipo de escala en función de los objetivos del estudio.

**1.5.10.1 Escalas Nominales.** Son el tipo más sencillo de escala. Se caracterizan en que los números utilizados en la prueba no tienen valor numérico real ya que sirven para designar o nombrar categorías en las características del producto evaluado. Por ejemplo, para identificar características olfativas de salsas de tomate, los panelistas pueden utilizar una escala nominal en que el número 1 = a fruta, el 2 = dulce, el 3 = picante y el 4 = acre. Durante la prueba, los panelistas califican con el número correspondiente a cada característica de olor presente en cada muestra. Posteriormente, los productos se comparan observando la frecuencia de cada

característica de olor en cada muestra. En este tipo de escala es posible utilizar nombres solamente, en lugar de números que representen a los nombres. Se puede dar nombre a las clasificaciones o categorías y las frecuencias obtenidas en cada clasificación pueden tabularse y compararse. De manera general, las muestras de alimentos pueden clasificarse como aceptables o no aceptables y se puede comparar el número de panelistas que juzga la muestra como no aceptable en relación al número de panelistas que la considera aceptable (Wittig de Penna, 2001).

**1.5.10.2 Escalas Ordinales.** En estas escalas, los números representan posiciones. Las muestras ordenan en función a magnitud. El orden asignado a una muestra no indica el tamaño de la diferencia con otra muestra. Las escalas ordinales se utilizan tanto en las pruebas orientadas al consumidor como las orientadas al producto. En paneles de consumidores, las muestras se ordenan con base a su preferencia o aceptabilidad mientras que, en las pruebas orientadas al producto, el ordenamiento en las intensidades de una característica específica del producto.

**1.5.10.3 Escalas de Intervalo.** Permiten ordenar muestras utilizando como criterio la magnitud de una sola característica del producto o a la respuesta de aceptabilidad o preferencia. Mediante este tipo de escalas es posible describir el grado de diferencias entre muestras, a través de mantener constante la magnitud de los intervalos de la escala.

La escala de categorías (hedónicas) y la escala lineal, son dos ejemplos de escalas sensoriales utilizadas frecuentemente como escalas de intervalos. La escala de categorías divide sus intervalos o categorías en magnitudes iguales. Las categorías se refieren con términos descriptivos y/o a través de números. En el establecimiento de las escalas, se pueden determinar todas las categorías o algunas de ellas, tales como los extremos y/o punto medio de la escala (Watts et al., 1992). El empleo de escalas hedónicas para medir preferencias, además permite medir estados psicológicos. En este método, la evaluación del producto responde de manera indirecta como resultado de la medida de una reacción humana. Se usa en pruebas controladas de laboratorio para determinar la posible aceptación de un producto. En la prueba, después de su primera impresión, se le solicita al juez responda cuando le agrada o desagrada el producto, esto lo registra de acuerdo a una escala verbal-numérica que va en la ficha de respuestas. La escala tiene nueve puntos, pero a veces resulta demasiado extensa, por lo que se opta por reducirla a siete o cinco puntos (Wittig de Penna, 2001):

1 = me disgusta extremadamente.

6 = me gusta levemente

2 = me disgusta mucho

7 = me gusta moderadamente

3 = me disgusta moderadamente

8 = me gusta mucho

4 = me disgusta levemente

9 = me gusta extremadamente

5 = no me gusta ni me disgusta

Los resultados del panel se analizan por varianza, pero también pueden transformarse en ranking y analizar por cómputos.

También se emplea en las pruebas la escala hedónica facial. Esta escala es principalmente aplicada para productos donde el consumidor es un niño, debido a que se puede interpretar de acuerdo a los gestos que el mismo hace, esto consiste en una serie de caritas o gestos faciales que interpreten la sensación que presenta el consumidor (Cárdenas-Mazón et al., 2018; Watts et al., 1992).

Ejemplo: Al hacer la prueba para una leche malteada sabor a chocolate.

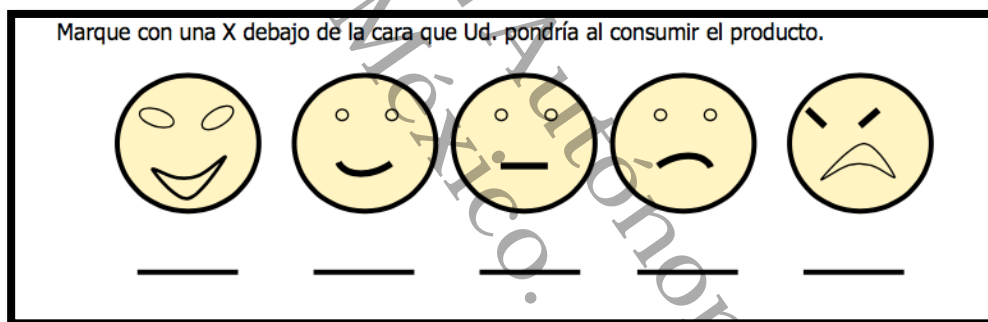


Figura 8. Ejemplo de escala hedónica facial

## Referencias

- Adams, R. H., Álvarez-Ovando, A., & Castañón, N. G. (2015). Efecto de la concentración de hidrocarburos sobre la producción del pasto (*Brachiaria humidicola*) en Texistepec, Veracruz (Effect of hydrocarbon concentration on pasture production (*Brachiaria humidicola*) in Texistepec, Veracruz). *Phyton, International Journal of Experimental Botany*, 84(1), 222-232.
- Adams, R. H., Cerecedo-López, R. A., Alejandro-Álvarez, L. A., Domínguez-Rodríguez, V. I., & Nieber, J. L. (2016). Treatment of water-repellent petroleum-contaminated soil from Bemidji, Minnesota, by alkaline desorption. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 13(9), 2249-2260. doi:10.1007/s13762-016-1058-4
- Adams, R. H., Zavala-Cruz, J., & Morales-García, F. A. (2008). Concentración residual de hidrocarburos en suelo del trópico. II: afectación a la fertilidad y su recuperación. *Interciencia* (Vol. 33, pp. 483-489).
- Adipah, S. (2019). Introduction of Petroleum Hydrocarbons Contaminants and its Human Effects. *Journal of Environmental Science and Public Health*, 3(1), 001-009.
- Albers, P. H. J. (2003). *Handbook of ecotoxicology Petroleum and individual polycyclic aromatic hydrocarbons* (Vol. 2): Lewis Publishers, USA.
- Alonso-Giner, M. (2011). La Química y el Olfato. *Química2011, España*. Retrieved from [http://www.quimica2011.es/sites/default/files/la\\_quimica\\_y\\_el\\_olfato.pdf](http://www.quimica2011.es/sites/default/files/la_quimica_y_el_olfato.pdf) website:
- Anzaldúa-Morales, A. (1994). *La evaluación sensorial de los alimentos en la teoría y la práctica*: Acribia Zaragoza.
- Atlas, R. M., & Bartha, R. (2002). *Ecología microbiana y microbiología ambiental*: Pearson-Addison Wesley.
- Befkadu, A. A., & Quanyuan, C. (2018). Surfactant-enhanced soil washing for removal of petroleum hydrocarbons from contaminated soils: a review. *Pedosphere*, 28(3), 383-410.
- Bohn, H. L., McNeal, B. L., O'Connor, G. A., & Orozco, M. S. (1993). *Química del suelo* (Vol. 1): Limusa México.
- Bravo, E. (2007). Los impactos de la explotación petrolera en ecosistemas tropicales y la biodiversidad. *Acción ecológica*, 24(1), 35-42.
- Cárdenas-Mazón, N. V., Cevallos-Hermida, C. E., Salazar-Yacelga, J. C., Romero-Machado, E. R., Gallegos-Murillo, P. L., & Cáceres-Mena, M. E. (2018). Uso de pruebas afectivas, discriminatorias y descriptivas de evaluación sensorial en el campo gastronómico. *Dominio de las Ciencias*, 4(3), 253-263.
- Carolan, M. S. (2008). When good smells go bad: a sociohistorical understanding of agricultural odor pollution. *Environment and Planning A*, 40(5), 1235-1249.
- Carpenter, R. P., Lyon, D. H., Hasdell, T. A., & Aguilera, M. A. (2002). *Análisis sensorial en el desarrollo y control de la calidad de alimentos*: Acribia.
- Cavazos-Arroyo, J., Pérez-Armendáriz, B., & Mauricio-Gutiérrez, A. (2014). Afectaciones y consecuencias de los derrames de hidrocarburos en suelos agrícolas de Acatzingo, Puebla, México. *Agricultura, sociedad y desarrollo*, 11(4), 539-550.
- Cepeda, D. (1991). *Química de suelos*, (2a. ed.): Trillas, México.

- Colorado-Peralta, R., & Rivera, J. M. (2014). Química del olor (Chemistry of the smell). Facultad de Ciencias Químicas-Orizaba. Universidad Veracruzana
- Coma, J., Bonet, J., & Companys, G. V. (2004). Producción ganadera y contaminación ambiental (Livestock production and environmental pollution). *XX Curso de Especialización FEDNA: Avances en nutrición y alimentación animal. Fira de Barcelona, España*, 237-272.
- CONAGUA. (2020). Resúmenes mensuales de temperaturas y lluvias. Recuperado de <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias> (Consultado 18 de febrero de 2020)
- Contreras, J. P., Ramírez, C., Garrido, N., & Núñez, G. (2015). *Caracterización hídrica y geológica de los aluviones del 25 y 26 de marzo de 2015 en la cuenca del Río El Salado, Región de Atacama, Chile*.
- Cuevas-Díaz, M. d. C., Reyes Espinosa, G., Hernández Ilizaliturri, C. A., & Cantú Mendoza, A. (2012). *Métodos ecotoxicológicos para la evaluación de suelos contaminados con hidrocarburos (Ecotoxicological methods for the evaluation of soils contaminated with hydrocarbons)*: Instituto Nacional de Ecología (INE), México.
- De la Cruz Morales, L. A. (2014). *Evaluación integral y sistemática de la contaminación de un suelo Acrisol con petróleo crudo. (Tesis de Licenciatura)*. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, División Académica de Ciencias Biológicas, México,
- Díaz-Ramírez, I., Ramírez-Saad, H., Gutiérrez-Rojas, M., & Favela-Torres, E. (2003). Biodegradation of Maya crude oil fractions by bacterial strains and a defined mixed culture isolated from *Cyperus laxus* rhizosphere soil in a contaminated site. *Canadian journal of microbiology*, 49(12), 755-761.
- Discovery Channel. (2007). Recuperación de Suelos, ¿Cómo Lo Resuelven?. Documental film about the remediation of the 18 de Marzo oil refinery in Mexico City. Discovery Networks Latin America, 25 Noviembre 2007, Silver Spring, Maryland, USA. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=r16fk40GnRc>
- Domínguez-Rodríguez, V. I., Adams, R. H., Vargas-Almeida, M., Zavala-Cruz, J., & Romero-Frasca, E. (2020). Fertility Deterioration in a Premeditated Petroleum-Contaminated Soil. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(2), 382.
- Echeverría, G., Graell, J., López, L., & Lara, I. (2008). La calidad organoléptica de la fruta. *Horticultura Internacional*, 61, 26-36.
- Eltarkawe, M. A., & Miller, S. L. (2018). The impact of industrial odors on the subjective well-being of communities in Colorado. *International Journal of Environmental Research Public Health*, 15(6), 1091.
- Eltarkawe, M. A., & Miller, S. L. (2019). Industrial odor source identification based on wind direction and social participation. *International Journal of Environmental Research Public Health*, 16(7), 1242.
- Espinosa-Manfugás, J. M. (2014). La ciencia sensorial. Su incidencia en la calidad del servicio de alimentos y bebidas y la satisfacción del cliente. *Revista Caribeña de Ciencias Sociales*(2014\_06).
- Eweis, J. B., Ergas, S. J., Chang, D. P., & Schroeder, E. D. (1998). *Bioremediation principles*: McGraw-Hill Book Company Europe.

- Gallardo-Lancho, J. F. G. (2017). *La materia orgánica del suelo: Residuos orgánicos, humus, compostaje y captura de carbono*: Universidad Autónoma Chapingo, México.
- Gutiérrez, M. d. C., & Zavala-Cruz, J. (2002). Rasgos hidromórficos de suelos tropicales contaminados con hidrocarburos. *Terra Latinoamericana*, 20(2), 101-111.
- Head, I. M., Jones, D. M., & Röling, W. F. (2006). Marine microorganisms make a meal of oil. *Nature Reviews Microbiology*, 4(3), 173-182.
- Hernández-Valencia, I., Lárez, L. M., & García, J. V. (2017). Evaluación de la toxicidad de un suelo contaminado con diferentes tipos de crudos sobre la germinación de dos pastos tropicales. *Bioagro*, 29(2), 73-82.
- Iglesias-García, A. R. (2017). Contaminación atmosférica por olores: unas técnicas de medida avanzadas y una legislación específica inexistente (Air pollution by odors: advanced measurement techniques and non-existent specific legislation). *Recuperado de [http://blog.condorchem.com/pdf/ponencia\\_olors\\_conama9.pdf](http://blog.condorchem.com/pdf/ponencia_olors_conama9.pdf)*. (accessed on 23 October 2018).
- International Organization for Standardization. Sensory analysis. Methodology. Initiation and training of assessors in the detection and recognition of odours., (2007).
- ISO. (2012). International Organization for Standardization. Standard ISO 8586: 2012 Análisis sensorial: directrices generales para la selección, formación y seguimiento de evaluadores seleccionados y evaluadores sensoriales expertos. Geneva, Switzerland.
- ISO. (2014). International Organization for Standardization. Standard ISO 8589:2010/A1:2014. Sensory analysis - General guidance for the design of test rooms. Geneva, Switzerland.
- Jaramillo, J. (2006). Repelencia al agua en suelos: una síntesis (Water repellency in soils: a synthesis). *Rev. Acad. Colomb. Cienc*, 30(115), 215-232.
- Jiménez-Ramírez, R. (2013). *Clasificación y caracterización de suelos de Tabasco con base en el enfoque geomorfopedológico (Tesis de Maestría)*. Colegio de Postgraduados Campus Tabasco, H. Cárdenas, Tabasco, México.
- Khan, F. I., Husain, T., & Hejazi, R. (2004). An overview and analysis of site remediation technologies. *Journal of environmental management*, 71(2), 95-122.
- Leyva-Cardoso, I. D. (2006). *Comparación de técnicas de saneamiento en un suelo contaminado con hidrocarburos del petróleo de Tabasco (Tesis de Maestría)*. Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- LGEEPA. (2018). Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. DOF, Última Reforma 05 de Junio de 2018. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México.
- Lim, M. W., Von Lau, E., & Poh, P. E. (2016). A comprehensive guide of remediation technologies for oil contaminated soil—present works and future directions. *Marine pollution bulletin*, 109(1), 14-45.
- Lluch Urpí, J. (2012). *Tecnología y margen de refino del petróleo*: Ediciones Díaz de Santos.
- López-Aguilar, S., Adams, R. H., Domínguez-Rodríguez, V. I., Gaspar-Génico, J. A., Zavala-Cruz, J., & Hernández-Nataren, E. (2020). Soil odor as an extra-official criterion for qualifying remediation projects of crude oil-contaminated soil *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 17.



- Lozada, M., Marcos, M. S., & Dionisi, H. M. (2013). *La biorremediación de ambientes costeros contaminados con hidrocarburos*: Secretaría de Cultura, Provincia del Chubut.
- Maceiras, R. (2016). Emerging technologies for soil remediation of hydrocarbons. *Pharm Anal Chem Open Access*, 2, e102.
- Marroquín, G. (2007). *Formación de sedimentos durante el hidrotreatmento catalítico de crudos pesados (Tesis de doctorado)*. IPN, México.
- Marshall, A. G., & Rodgers, R. P. (2004). Petroleomics: the next grand challenge for chemical analysis. *Accounts of chemical research*, 37(1), 53-59.
- Morales-Bautista, C. M. (2014). *Evaluación de la contaminación con hidrocarburos del petróleo sobre suelos aluviales del trópico mexicano (Tesis de Doctorado)*. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, México.
- Moreno Ramón, H., & Ibañez Asensio, S. (2019). *Procesos formadores: La Gleyficación. Universidad Politécnica de Valencia*.
- Murguía, W. (2007). Contaminación por olores: el nuevo reto ambiental (Odor pollution: the new environmental challenge). *Gaceta Ecológica. Instituto Nacional de Ecología. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales*(82), 49-53.
- Narro-Farías, E. (1994). *Física de Suelos: con enfoque agrícola*: Trillas, México.
- Nematollahi, H., Moradi, N., RiyaziNejad, M., & Vahidi, H. (2018). Removal of aliphatic hydrocarbons from gas oil contaminated clay soil via soil vapor extraction. *Civil Engineering Journal*, 4(8), 1858-1868.
- Noguera, K., & Olivero, J. (2010). Los rellenos sanitarios en Latinoamérica: caso colombiano (Sanitary landfills in Latin America: Colombian case). *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 34(132), 347-356.
- Ola, S., Fadugba, O., & Uduebor, M. (2017). *In-Situ Chemical Oxidation of Hydrocarbon Contaminated Groundwater (A Case Study of Baruwa Community, Lagos, Nigeria)*. Paper presented at the International Congress and Exhibition " Sustainable Civil Infrastructures: Innovative Infrastructure Geotechnology".
- Ortiz-Solorio, C. A. (2019). *Edafología* (Trillas Ed. 1a ed.). México.
- Palma-López, D., Cisneros, D. J., Moreno, C., & Rincón-Ramírez, J. A. (2007). *Suelos de Tabasco: su uso y manejo sustentable* (Vol. 195). Villahermosa, Tabasco, México: Colegio de Postgraduados-ISPROTAB-FUPROTAB. .
- Palma-López, D., Jiménez-Ramírez, R., Zavala-Cruz, J., Bautista-Zúñiga, F., Gavi-Reyes, F., & Palma-Cancino, D. (2017). Actualización de la clasificación de suelos de Tabasco, México. *Agro Productividad*, 10(12), 29-35.
- Pellini, L. (2006). Biorremediación estimulada por efluentes cloacales tratados de suelos contaminados con hidrocarburos. *Escuela superior de Salud y Ambiente, Universidad Nacional de Comahue*.
- PEMEX. (2018). Informe de Sustentabilidad. Disponible en [https://www.pemex.com/etica\\_y\\_transparencia/transparencia/informes/Paginas/info\\_rmes.aspx](https://www.pemex.com/etica_y_transparencia/transparencia/informes/Paginas/info_rmes.aspx) (Consultado el 07 de septiembre de 2019).

- Poivet, E., Tahirova, N., Peterlin, Z., Xu, L., Zou, D.-J., Acree, T., & Firestein, S. (2018). Functional odor classification through a medicinal chemistry approach. *Science advances*, 4(2), eaao6086.
- Porta, J., Lopez Acevedo, M., & Poch, R. (2014). *Edafología: Uso y Protección de Suelos (Edaphology: Use and Protection of Soils)* (3rd ed.). Mundi-Prensa: Madrid, Spain.
- Puerta-Quintero, G. I. (2009). *Los catadores de café* (0120-0178). Retrieved from Colombia:
- Ramos-Rincón, M., Bermudez, A., & Rojas, T. (2018). Contaminación odorífera: causas, efectos y posibles soluciones a una contaminación invisible (Odor pollution: causes, effects and possible solutions to invisible pollution). *RIAA*, 9(1), 4.
- Rivera-Cruz, M. C., & Trujillo-Narcía, A. (2004). Estudio de toxicidad vegetal en suelos con petróleos nuevo e intemperizado. *Interciencia*, 29(7), 369-376.
- Rodriguez-Campos, J., Perales-García, A., Hernandez-Carballo, J., Martinez-Rabelo, F., Hernández-Castellanos, B., Barois, I., & Contreras-Ramos, S. M. (2019). Bioremediation of soil contaminated by hydrocarbons with the combination of three technologies: bioaugmentation, phytoremediation, and vermiremediation. *Journal of soils and sediments*, 19(4), 1981-1994.
- Rodriguez-Gil, G. (2004). El poderoso sentido del olfato (The powerful sense of smell). *enResources*, 11(2), 1-3.
- Rucks, L., García, F., Kaplán, A., Ponce de León, J., & Hill, M. (2004). *Propiedades físicas del suelo*: Universidad de la República: Facultad de agronomía. Montevideo, Uruguay.
- Sáenz, L. E., Zambrano, D. A., & Calvo, J. A. (2016). Percepción comunitaria de los olores generados por la planta de tratamiento de aguas residuales de El Roble-Puntarenas, Costa Rica (Community perception of odors generated by the El Roble-Puntarenas wastewater treatment plant, Costa Rica). *Tecnología en Marcha*, 29(2), 137-149.
- Sakawi, Z., Sharifah, S., Jaafar, O., & Mahmud, M. (2011). Community perception of odor pollution from the landfill. *Research Journal of Environmental and Earth Sciences*, 3(2), 142-145.
- Sancho, V. J., Bota Prieto, E., & de Castro Martín, J. J. (1999). *Introducción al análisis sensorial de los alimentos* (Vol. 4): Edicions Universitat Barcelona.
- Schutz, H. (1971). *Sources of invalidity in the sensory evaluation of foods*. IFT, EEUU.
- SEMARNAT. (2002). Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000 Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D.F. México: Diario Oficial, 31 de diciembre de 2002.
- SEMARNAT. (2013). Norma Oficial Mexicana NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012 Que establece los límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y las especificaciones para su caracterización y remediación. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D.F. México: Diario Oficial de la Federación, 30 de octubre de 2013.
- SEMARNAT. (2019). El medio ambiente en México (Resíduos - Los sitios contaminados). Recuperado de [https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe\\_resumen14/07\\_residuos/7\\_4\\_1.html#:~:text=Los%20sitios%20contaminados%20pueden%20definirse,organismos%20vivos%20y%20el%20aprovechamiento](https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_resumen14/07_residuos/7_4_1.html#:~:text=Los%20sitios%20contaminados%20pueden%20definirse,organismos%20vivos%20y%20el%20aprovechamiento) (Consultado el 4 de abril de 2020)

- SGM. (2017). Características del petróleo (Oil characteristics). México: Servicio Geológico Mexicano.
- Soil Survey Staff. (2014). *Keys to soil taxonomy (Claves para la Taxonomía de Suelos)*. Washington D.C. USA.: Natural Resources Conservation Service. Agriculture Department Retrieved from [https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE\\_DOCUMENTS/nrcs142p2\\_051546.pdf](https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_051546.pdf)
- Surco-Almendras, J. C., & Alvarado-Kirigin, J. A. (2011). Estudio estadístico de pruebas sensoriales de harinas compuestas para panificación. *Revista boliviana de química*, 28(2), 79-82.
- Toro Gómez, M. V. (2013). Métodos para el monitoreo de olores ofensivos (Methods for monitoring offensive odors). Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia. Pdf.
- Torricella, R., & Huerta, V. (2008). *Análisis sensorial aplicado a la restauración*. Ciudad de La Habana: Instituto Culinario de México-Editorial Universitaria.
- Trujillo-Narcia, A., Rivera-Cruz, M. C., Lagunes-Espinoza, L. C., Palma-López, D. J., Soto-Sánchez, S., & Ramírez-Valverde, G. (2012). Efecto de la restauración de un fluvisol contaminado con petróleo crudo. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 28(4), 360-374.
- Van Deuren, J., Wang, Z., & Ledbetter, J. (1997). Remediation technologies screening matrix and reference guide. Tercera edición. Technology Innovation Office, EPA.
- Velasquez-Arias, J. A. (2017). Contaminación de suelos y aguas por hidrocarburos en Colombia. Análisis de la fitorremediación como estrategia biotecnológica de recuperación. *Revista de investigación Agraria y Ambiental*, 8(1), 151-167.
- Vidonish, J. E., Zygourakis, K., Masiello, C. A., Sabadell, G., & Alvarez, P. J. (2016). Thermal treatment of hydrocarbon-impacted soils: a review of technology innovation for sustainable remediation. *Engineering*, 2(4), 426-437.
- Viñas-Canals, M. (2005). *Biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos: caracterización microbiológica, química y ecotoxicológica (Tesis de Doctorado)*. Universitat de Barcelona, España.
- Volke-Sepúlveda, T., & Velasco Trejo, J. A. (2002). *Tecnologías de remediación para suelos contaminados*: Instituto Nacional de Ecología, México.
- Watts, B. M., Ylimaki, G. L., Jeffery, L. E., & Elías, L. G. (1992). Métodos sensoriales básicos para la evaluación de alimentos (Basic sensory methods for food evaluation). CIID, Ottawa, ON, CA.
- Wauquier, J.-P. (2004). *El refinado del petróleo: petróleo crudo, productos petrolíferos, esquemas de fabricación*: Ediciones Díaz de Santos, Madrid, España.
- Wittig de Penna, E. (2001). *Evaluación Sensorial: Una metodología actual para tecnología de alimentos*: Santiago de Chile.
- Zamora-Utset, E. (2007). *Evaluación objetiva de la calidad sensorial de alimentos procesados*: Editorial Universitaria (Cuba).
- Zarra, T., Naddeo, V., & Belgiorno, V. (2009). A novel tool for estimating the odour emissions of composting plants in air pollution management. *Global Nest Journal*, 11(4), 477-486.

Zavala-Cruz, J., Gavi-Reyes, F., Adams, R. H., Ferrera-Cerrato, R., Palma-López, D. J., Vaquera-Huerta, H., & Domínguez-Ezquivel, J. M. (2005). Derrames de petróleo en suelos y adaptación de pastos tropicales en el Activo Cinco Presidentes, Tabasco, México. *Terra Latinoamericana*, 23(3), 293-302.

Zavala-Cruz, J., Jiménez Ramírez, R., Palma-López, D. J., Bautista Zúñiga, F., & Gavi Reyes, F. (2016). Paisajes geomorfológicos: base para el levantamiento de suelos en Tabasco, México. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 3(8), 161-171.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.  
México.

**CAPITULO II Soil Odor as An Extra-Official  
Criterion for Qualifying Remediation Projects of  
Crude Oil-Contaminated Soil.**

**El olor del suelo como criterio extra-oficial para  
calificar Proyectos de remediación de suelos  
contaminados con petróleo crudo.**

## **CAPITULO II Soil Odor as An Extra-Official Criterion for Qualifying Remediation Projects of Crude Oil-Contaminated Soil.**

### **El olor del suelo como criterio extra-oficial para calificar Proyectos de remediación de suelos contaminados con petróleo crudo.**

En el presente capítulo se describe el desarrollo inicial de la presente investigación, cuyo primer objetivo consistió en simular un derrame de petróleo crudo tipo mediano y pesado en tres tipos de suelo de diferente textura característicos del sureste mexicano (Fluvisol, Gleysol y Arenosol); posteriormente, atendiendo el segundo objetivo, se simuló un proceso de remediación y atenuación natural por un período de 18 meses. Las muestras de suelo fueron colocadas en celdas de 40 cm x 40 cm x 20 cm de block de cemento-arena sobre un piso firme. Previo al proceso, se caracterizaron los suelos antes y después de ser contaminados. Posteriormente, cada dos meses se evaluaron: capacidad de campo, repelencia al agua, humedad crítica y el olor a suelos.

La concentración inicial de los hidrocarburos fue de 20,000 mg kg<sup>-1</sup>, lográndose reducir aproximadamente en un 80 % o más, con valores en un rango de aproximadamente 2,200 a 4,300 mg kg<sup>-1</sup>, muy cercanos a límite máximo permisible por la normatividad ambiental mexicana (3,000 mg kg<sup>-1</sup>). A pesar de estas bajas concentraciones, finalizado el tratamiento en un ambiente tropical, se observó que los parámetros de fertilidad no lograron recuperarse. La capacidad de campo estuvo muy por debajo de los niveles de las muestras de suelos no contaminados, así también, muchas de las muestras que antes de ser contaminados eran mojables, presentaron repelencia al agua, siendo más evidente en el suelo arenoso. Algunas de estas muestras repelentes al agua se seleccionaron para determinar el contenido crítico de humedad en el que puede manifestarse la repelencia al agua. En cuanto a las pruebas de toxicidad aguda debida a los hidrocarburos, aunque la concentración no se redujo a niveles realmente bajos, no se observó mortalidad en los organismos y muy pocos signos de estrés, solo una mínima pérdida de biomasa. Aunque el suelo no sea tóxico, el hecho de no retener suficiente humedad no garantiza mantener parte de la fauna del suelo más sensible, como son lombrices, nemátodos y las finas raíces de algunas plantas.

Para dar respuesta al tercer objetivo específico, respecto de las pruebas de olor en una comunidad urbana, se evaluó la intensidad y aceptación respondiendo las preguntas ¿Huele a petróleo crudo? y ¿Es agradable o desagradable?, a través de una escala de siete niveles, complementados de tres preguntas dicotómicas confirmatorias de las aptitudes del suelo para fines de cultivo. El panel urbano lo integraron trabajadores del área de mantenimiento y estudiantes de Ingeniería Ambiental de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Se

realizaron un total de nueve pruebas de percepción de olor durante los 18 meses que duró el estudio. Los olores de todos los suelos fueron percibidos por los panelistas urbanos con una intensidad entre neutral y levemente agradable, siendo aceptables de manera general al concluir el tratamiento.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.  
México.



Article

## Soil Odor as An Extra-Official Criterion for Qualifying Remediation Projects of Crude Oil-Contaminated Soil

Saúl López-Aguilar <sup>1</sup>, Randy H. Adams <sup>2\*</sup>, José A. Gaspar-Génico <sup>2</sup>, Joel Zavala-Cruz <sup>3</sup>, Verónica Isidra Domínguez-Rodríguez <sup>2</sup> and Edith Hernández-Nataren <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, Subsele Reforma, Carretera Reforma-Juárez Km. 6.5. Ra. Sta. Cruz, Reforma, Chiapas 29500, México; sloaguilar@hotmail.com

<sup>2</sup> División Académica de Ciencias Biológicas, Laboratorio de Remediación, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Carretera Villahermosa-Cárdenas km. 0.5 s/n, Villahermosa, Tabasco 86150, México; tazvro@hotmail.com (V.I.D.-R.); genico220@gmail.com (J.A.G.-G.)

<sup>3</sup> Colegio de Postgraduados, Campus Tabasco. Periférico Carlos A. Molina s/n, H. Cárdenas, Tabasco 86500, México; zavala\_cruz@colpos.mx (J.Z.-C.); nataren.edith@colpos.mx (E.H.-N.)

\* Correspondence: drrandocan@hotmail.com

Received: 24 February 2020; Accepted: 11 April 2020; Published: 5 May 2020

**Abstract:** Unfortunately, many property owners in southeastern Mexico do not trust environmental authorities, and the de facto method they use to evaluate the progress in environmental remediation projects is soil smell. This criterion was evaluated to determine if it was reliable to assess soil fertility and toxicity. Three soils (Fluvisol, Gleysol, and Arenosol), were contaminated with 2% medium or heavy crude oil (30.2, 17.1° API, respectively), and treated for 18 months to simulate bioremediation or natural attenuation. Every two months, field capacity, water repellency, hydrocarbon concentration, acute toxicity and soil odor were measured. Odor was measured in controlled conditions with a group of unexperienced panelists. During remediation, the Fluvisol and Gleysol were perceived to have an odor intensity between slight to low, and were considered acceptable. Meanwhile, in the Arenosol, the odor intensity was between low to medium and was considered unacceptable. After treatment, the hydrocarbon concentration was reduced to low levels, very near Mexican norm, and all the soils, including the Arenosol, were perceived to have an intensity between neutral to slightly agreeable, were considered acceptable, and no toxicity was observed in the earthworm bioassay (no false positives). However, in various soil samples from the Fluvisol and Arenosol, important risks were present with respect to field capacity and water repellency. Due to these observations, even though soil smell may be a trustworthy guide to soil toxicity, it does not ensure that the remediated soil's fertility has been restored.

**Keywords:** perception; odor; bioremediation; natural attenuation; petroleum



## 1. Introduction

In Mexico, the regulations for the characterization and remediation of hydrocarbon-contaminated sites are governed by a system of laws, regulations and norms, which together try to guarantee that site remediation achieves three objectives: 1) protection of the environment, including living beings and biological processes, 2) protection of public health, and 3) restoration of the site such that it can be used according to its natural vocation or any activity considered in a program of urban development (Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente—LGEEPA, Art.134, fracc. V, and Art. 136) [1]. Among those actions which should be considered in the remediation of contaminated sites are the reduction in toxicity, the potential for leachates (and contamination of water bodies and aquifers), as well as those measures that permit the re-establishment of the physical and chemical properties associated with soil fertility [2].

To try to assure compliance with the Maximum Permissible Limits (MPLs) in the Mexican Norm, a process has been established to accredit individuals, companies and institutions to be legally recognized for sample collection and analysis of soil from contaminated/remediated sites. However, this supposes that the social mechanisms exist to assure that the application of the MPLs are indeed being met [3,4]. Nonetheless, the individuals and institutions that watch over the remediation companies can be corrupted. There is a possibility that the persons responsible for certain areas of accredited laboratories would be willing to report results in favor of the remediation company in exchange for an extra-official gratuity. This situation can also present itself with respect to some persons within the environmental authorities charged with watching over the remediation companies, as well as with the project supervisors responsible for the remediation project on the part of petroleum companies. This possibility of personal corruptibility puts the true compliance of the MPLs in question. Furthermore, there is no guarantee that remediated soils that achieve the MPLs will indeed have their fertility restored [5,6]. Often, these soils may still suffer from water repellency and reduction in the field capacity. In the case of some soils, especially red clay petroleum-contaminated soils, compaction may also be a problem. According to the experiences of various persons working in remediation companies, the de facto criteria used by property owners, remediation personnel, and site supervisors are organoleptic, especially soil odor [7,8].

The sense of smell, as well as taste, is a chemical sense, due to its capacity to detect volatile chemical substances in the environment at the moment that we breathe. Compared to any other of our senses, the sense of smell is 10,000 times more sensitive, and the

recognition of smells can be immediate, even if the compound perceived is found in low concentrations in the air. This information is sent straight to the brain [9–11]. Even though the sense of smell is important, it is one of the senses least studied due to its subjective nature, and measuring smell has required the empirical development of sensory techniques [12]. Specifically, there is no literature or norm that refers to the evaluation of odor perception of crude-oil contaminated soils that could be considered as a criterion for evaluating the effectiveness of remediation projects. Those studies that do exist on odor are scarce and are focused principally on the food, perfume, and wine industries. However, this is starting to change. Smell is being studied more, specifically with respect to the acceptability of unpleasant odors from production plants and their relationship to the perceived public good. The existent investigations allude to the impacts from unpleasant and offensive odor emissions to community residents. This has been with the purpose of comparing intensity and the acceptance level [13,14], general contamination from odors [15], odors coming from wastewater treatment plants [16], sanitary landfills [17,18], agriculture and livestock raising [19–21], as well as paper processing plants, refineries, fertilizer plants, and thermal-electric plants. From these studies, one can conclude that most countries do not have adequate emission control legislation to protect community members from extremely unpleasant odors, presenting areas of opportunity for resolving one of the main sources of social anger directed at economically productive activities [12,22].

The hypothesis of the present study was that the perception of hydrocarbons in remediated soils can be used as a trustworthy criterion to assure that the toxicity is in the same range as background, and that soil fertility is restored. The objective of this research was to evaluate smell as a criterion that can discriminate the effectiveness of the remediation of soils contaminated with medium and heavy crude oil.

## **2. Materials and Methods**

### *2.1 Selection of Soil and Crude Oil Samples, Experimental Cell Preparation, Simulation of Contamination and Remediation*

To simulate a terrestrial oil spill and subsequent bioremediation or natural attenuation, soils were selected and located based on the soil classification proposed by Palma-López [23] for Tabasco State. Three soils with different textures representative of the region were selected: an Arenosol, a Gleysol and a Fluvisol, which were identified by their characteristics in the field and in soil profiles according to Zavala and García [24]. These soils are classified in Mexico according to the WRB system [25]. Since many countries also use the Soil Taxonomy

(ST) system [26,27], the approximate equivalents are also given in ST: Arenosol  $\approx$  Psamment, Gleysol  $\approx$  Aquent, and Fluvisol  $\approx$  Fluvent. They correspond to a sandy coastal soil in vegetated dunes (Haplic Arenosol), a clayey, floodable soil from a marshy area (Eutric Gleysol), and a medium textured river levee soil (Eutric Fluvisol). The physical-chemical properties of the uncontaminated soils, as well as their coordinates, are shown in Table S1.

Approximately 600 kg was collected for each soil at a depth of 0–30 cm. This was done considering that for the majority of crops, most of the roots are at this depth [28]. Straight shovels were used to hand dig and to collect representative material from the 0–30 cm depth. The soil collected was placed in plastic-fiber gunny sacks and transported to the laboratory. The Arenosol was collected in a coastal area previously described by Adams [29]. The vegetation at this site was principally humidicola grass (*Brachiaria humidicola*), and coconuts (*Cocos nucifera*). The Gleysol was located in a floodplain near the Blasillo River (881 m from the river) and has been described previously [24,30]. The vegetation at this site consisted predominantly of induced, flood-tolerant pastures. Likewise, the Fluvisol was obtained from a property near the Blasillo River (146 m from the river) and has been described previously by Morales Bautista [30]. The soil samples were open-air dried and plant roots removed. Later, the soils were ground, screened and homogenized, and then characterized for physical and chemical parameters before being contaminated. The methods used for these determinations are presented in Section 2.2.

The collection of crude oils was carried out in different oil wells in the Samaria Production Unit of the state run oil company, Petróleos Mexicanos. The verification of  $^{\circ}$ API was carried out using the ASTM D6822-12b method [31] using Kessler ASTM 52HH y 53HH thermohydrometers with different  $^{\circ}$ API scales, and a thermometer as per Guzmán-Osorio et al. [32]. The medium crude oil sample (30.23  $^{\circ}$ API) was obtained from well No. 7105 and the heavy crude oil sample (17.7  $^{\circ}$ API) was obtained from well No. 851, both in the Samaria Oil Field, in Tabasco State (Mexico).

An outdoor patio with a concrete floor was used to build the treatment cells (36 total). The cells were built using cement blocks on top a  $\sim$ 3 cm layer of sand for drainage. The cell dimensions were 40 cm  $\times$  40 cm by 20 cm deep. In each cell, on top of the sand layer, a  $\sim$ 1 mm high density polyethylene plastic sheet was placed, with holes punched in the bottom to help drainage. The capacity of each cell was 40 kg, as per Adams et al. [2], (see Figure 1). Afterwards, soil was contaminated at a concentration of 20,000 mg/kg of medium crude oil ( $\sim$ 30  $^{\circ}$ API) or heavy crude oil ( $\sim$ 18  $^{\circ}$ API) as per Marín-García et al. [33], using a small cement

mixer with a 255 L capacity, mixing at 15 RPM. The contaminated soils were placed in the treatment cells on top of the plastic sheet, and their orientation in the patio was randomized. Newly contaminated soil from the treatment cells were characterized for field capacity, water repellency, and hydrocarbon concentration (Total Petroleum Hydrocarbons—TPH).



**Figure 1.** Bioremediation and natural attenuation treatment cells. Above: recently prepared treatment cells. Below: cells after several months of treatment. Note that many cells became naturally vegetated with weedy plants, principally grasses and sedges.

Semi-passive bioremediation was simulated by adding an inorganic fertilizer, N-P-K 17:17:17, also known as “Triple 17” (Fertilizantes GL, S.A. de C.V.), to a final concentration of  $300 \text{ mg N kg}^{-1}$  of soil, and well mixed. The treatment cells were left outdoors for 18 months, during which they received rain water, solar radiation, growth of (uncultivated) vegetation, and other climatic variables that were not directly controlled (Figure S1). This experiment was carried out in a tropical monsoon climate (Am in the Köppen classification system) with an

average temperature of ~28 °C, annual precipitation of ~2100 mm, and relative humidity usually between 50–85%, as described by Adams et al. [34]. During this period the petroleum gradually biodegraded simulating a bioremediation project. Alternatively, no nutrients were added during this period, to simulate natural attenuation by microbial activity, volatilization, dilution, adsorption, complexing, and abiotic transformation. This is a simple, low-cost technique [35].

## 2.2 Initial Characterization of Soil and Determination of Fertility Parameters

The initial characterization of the soils included electrical conductivity, bulk density, pH, nitrogen, phosphorous, potassium, % organic material, and texture, which were determined according to Mexican Norm NOM-021-SEMARNAT-2000 [36], solid density which was determined by the method proposed by Domínguez and Aguilera [37]; and field capacity which was analyzed according to the Colman column method [38,39] as per Zavala et al. [40]. (Table S1).

One of the major impacts to soil fertility in petroleum-contaminated soils, is interference with the normal soil–water–plant relationship. This is due to the formation of thin laminates of hydrocarbons on what would otherwise be wettable surfaces of soil aggregates [29,41]. This appears to be the cause of soil water repellency [30], as well as a reduced moisture content at 100% field capacity. For this reason, water repellency and field capacity were evaluated as the main impacts to fertility in the petroleum-contaminated (and remediated) soils. Field capacity was evaluated as mentioned previously. Soil water repellency was run in two ways: 1) for severity (Molarity Ethanol Drop—MED) by the method proposed by King (1981) with modification by Adams [29] et al. (2008a); and 2) for persistence (Water Drop Penetration Time—WDPT), also as per Adams [29] (Tables S2, S3 and S4).

For the present study, compaction was not evaluated, being more prevalent in petroleum- contaminated soils with predominantly kaolinite clays [6], or in soils in which surface and subsurface horizons have been mixed during the remediation process [5]. As this study only involves surface soil, with very little clay (Arenosol) or with predominantly smectite clays (Fluvisol, Gleysol), compaction was not considered a primary fertility parameter likely to be impacted by crude oil contamination.

## 2.3 Critical Moisture Content

Generally, water repellency is determined in dry soil. However, in the field it has been demonstrated that repellency depends on the moisture content of the soil. Even during the

driest part of the year there is still a little moisture in the soil that could mitigate water repellency [42,43]. For this reason, Critical Moisture levels were determined. This was done by measuring the penetration times of water drops at different soil moisture contents according to Guzman-Osorio and Adams [44].

#### 2.4 Total Petroleum Hydrocarbons

Total Petroleum Hydrocarbons (TPHs) were quantified by the EPA method 418.1 [45] according to Adams et al [2], Mayo-López et al. [46] and Adams and Guzmán-Osorio [47] using perchloroethylene as a solvent, and the medium and heavy crude oil to prepare independent calibration curves, as per Adams [29]. For both the medium crude and heavy crude, there were slightly asymptotic functions of concentration vs. absorbance. The linear form of this function for medium crude showed a linearity of  $R = 0.96$ , with a Limit of Quantitation of  $2349 \text{ mg kg}^{-1}$ , a Limit of Detection of  $443 \text{ mg kg}^{-1}$  and a Sensibility of  $263 \text{ mg kg}^{-1}$ . For the heavy crude, the linearity was  $R = 0.97$ , with a Limit of Quantitation of  $2096 \text{ mg kg}^{-1}$ , a Limit of Detection of  $388 \text{ mg kg}^{-1}$  and a sensibility of  $257 \text{ mg kg}^{-1}$ . This parameter was determined at the beginning of the remediation treatment process and every two months thereafter up until 18 months.

#### 2.5 Earthworm Bioassays

These tests were run with *Eisenia foetida* using a modification of Protocol 207 of the OECD (1984) according to Domínguez-Rodríguez et al. [48,49]. The bioassays were run by direct contact with the soil, without dilution. The tests were done after the fourteenth and sixteenth month, and at the end of the treatments. The direct contact test consists of exposing earthworms to a thin layer of moist soil, using 10 replicates per test. The test jars were covered with gauze to assure air availability and to avoid escape. The tests were monitored for 48 hours. Those worms that survived this period were washed with distilled water, dried, and weighed to determine biomass.

#### 2.6 Odor Perception Test

To carry out the odor perception tests, a temporary installation was employed as per ISO 8589:2010/A1:2014 [50,51]. A semi-quantitative questionnaire was used that was composed of three yes/no or multiple choice questions to evaluate the intensity and acceptability of the samples. The multiple choice questions were based on an odor scale of seven levels from “without odor” to “very strong odor” for intensity, and “very pleasant” to “very unpleasant”, for acceptability (Figure S2). These results were analyzed using descriptive statistics including percentages, averages and standard deviation. For those data obtained on the tests of intensity

and acceptability (with ordinary variables), and their relationship to parameters such as field capacity, water repellency, TPH concentration and toxicity (ratio variables), a non-parametric test of bi-variable regression was used, Spearman's Rho, with a level of confidence of  $\alpha = 0.05$ . For this, the IBM SPSS Statics 20 package (International Business Machines Corp., Armonk, NY, USA) for Windows was used [52,53].

Panelist received information previous to the test with respect to test objectives and procedure. For the first two test on odor, 16 and 11 male panelist (judges) between 30 and 50 years old participated, from the university maintenance department. For the following tests, 15 panelists participated, male students between 19 and 25 years old from the environmental engineering bachelor's program at the university. Samples were previously prepared in uniform jars covered with brown paper. Humidity in the samples was homogenized at 70 % of field capacity, and the room conditions were  $\sim 24$  °C, and  $\sim 50$  % relative humidity. To each panelist, 36 jars were assigned, only identified by a code unknown to the panelists. The order for testing the samples was randomized. Each panelist gently unscrewed one jar at a time, counted two seconds, brought the jar to within five centimeters of their nose, and softly inhaled to perceive the sample odor, usually for five to ten seconds.

The samples were made up of three kinds of soils contaminated with two kinds of crude oil and subjected to simulations of either semi-passive bioremediation or natural attenuation. Panelists were offered room-temperature drinking water and slices of apple to clear the palate during programmed pauses. After each set of nine samples, the panelists had a brief, five minute break if they felt they needed it. Whenever the samples tested did not have strong odors, the time between testing each sample was relatively short, without the necessity of limiting the number of samples in each session [52,53].

## 2.7 Ethics

The research protocol was evaluated and approved by the Divisional Research Committee of the Biological Sciences Academic Division of the Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (Folio No. 395-2017) after considering protection to human health, dignity and scientific rigor. More details can be found in Supplementary Materials, including the consent form (Figure S3) and the panelist' data form (Figure S4).

## 3. Results

### 3.1 Characterization of Initial and Treated Soil Samples

The detailed results of initial soil characterization and major changes in TPH resulting from the semi-passive bioremediation or natural attenuation are shown in the

Supplementary Material accompanying this article (Table S1, Figures S5–S8). In general, from an initial concentration of 20,000 mg/Kg, the TPH were reduced roughly 80% or more, into the range of about 2200 to 4300 mg/Kg, and very near the Maximum Permissible Limit (MPL) in Mexican norm (3000 mg/Kg) [54]. However, even at these very low levels, the ability of the soil to maintain moisture (field capacity) was much below uncontaminated levels, to about 50–70% in the Fluvisol (river levee soil), to about 45–60% in the Gleysol (clayey, floodable soil), and to about 40–75% in the Arenosol (sandy coastal soil).

### 3.2 Water Repellency

With respect to soil water repellency, the results were mixed. Initially, prior to contamination with crude oil, all the soils were wettable (not water repellent). However, after contamination, and even after 18 months of treatment in a humid, tropical environment, many samples were still water repellent. This was most apparent in the sandy soil (Arenosol). In this soil, all samples showed a severity classified as “very severe” (King, 1981) [55] and a persistence classified as “extreme” [42]. In the river levee soil (Fluvisol), the severity was moderate to severe in the samples contaminated with medium crude, and very severe in the samples contaminated with heavy crude. Likewise, with respect to persistence, the final Fluvisol samples showed strong to extreme values. In contrast, in the clayey, floodable soil (Gleysol), in those samples contaminated with medium crude, after 18 months of treatment, the severity was null and the persistence was only slight. However, in the Gleysol samples contaminated with heavy crude, the final values for severity were low to moderate, and had a persistence classification as “strong”.

These evaluations of water repellency are conventionally carried out on dry samples in standardized tests. However, it has been shown that even during the dry season, the soil usually has at least a little moisture, and that this residual moisture may partially mitigate the water repellency [29,33,56]. For this reason, some of the water repellent samples were selected for further study—to determine the critical moisture content at which water repellency may manifest. This is especially important for those samples with more moderate water repellency. Final samples for the Fluvisol contaminated with medium crude were selected (with and without fertilization) as well as the sample contaminated with heavy crude and without fertilization (for comparison). Likewise, the Gleysol samples contaminated with heavy crude were also selected. The Arenosol samples had such high water repellency, and the Gleysol samples contaminated with medium crude had such low water repellency, that they were not included in the evaluation (Table S5).



### 3.3 Critical Moisture Content

In the Fluvisol samples contaminated with medium crude, the critical moisture content to manifest slight water repellency (for a drop of water to absorb in 60 seconds or less) was about 9–11.5% H, and to be completely wettable (for a drop of water to absorb in five seconds or less) was about 14–15%. Likewise, in the Fluvisol contaminated with heavy crude and with fertilization, these values were about 13.5% H and 17% H, respectively. Thus, for these soils, in natural, field conditions, the moisture content would have to drop to about 14–17% to just start to manifest water repellent conditions, and even at moisture contents in the range of about 9–14% H, the water repellency would only be slight (Table 1). In a nearby similar soil (only about 60 m from the Fluvisol in question) Marin-García [33] found that even during the dry season, the in situ moisture content of the soil was 14.8% H at the surface and 15.5% H in soil crevasses. These values are generally higher than those found for the critical moisture content in the Fluvisol in the present study, and therefore, it is unlikely that in the field, water repellency would manifest in these samples, or if so, only slightly and for a brief period of the year.

In relation to the Gleysol samples studied, the moisture content to be completely wettable were about 17–18% H and to be only slightly water repellent were about 14–14.5% H. Adams [29] found that in these kinds of soil, even during the driest part of the year the soil maintained 80% of field capacity. In this soil that would be almost 30% H, much higher than the critical levels. As such, it is very, very improbable that in this soil water repellency would present itself, even during the dry season.

**Table 1.** Critical humidity in Fluvisol and Gleysol.

SAMPLE	HTP (mg kg <sup>-1</sup> )	MED 10 (Molarity)	H.C. 5s (%)	H.C. 60s (%)	Observations
FLMC-W/O F	2,996.91	2.11	13.89	8.94	Probably not repellent in field conditions
FLMC-WF	3,855.72	2.81	14.99	11.49	
FLHC-W/O F	4,335.04	3.46	17.08	13.61	Probably not repellent in field conditions
GLHC-W/O F	3,753.90	0.62	17.08	14.09	Probably not repellent in field conditions
GLHC-WF	4,033.87	2.00	18.04	14.45	

FL = Fluvisol; GL = Gleysol; MC = Medium Crude Oil; HC = Heavy Crude Oil; W/O F = Without Fertilizer; WF = With Fertilizer; H.C.5 = Critical moisture (WDTP = 5 s); H.C.60 = Critical moisture (WDTP = 60 s).

### 3.4 Field Capacity

To sum up the results on the soil–water relationship in the contaminated and treated samples, even after treatment, all samples had less field capacity, in the range of about 40–75% of initial levels (Figure S9). Additionally, the anticipated water repellency in the field was

very high for the sandy soil, generally high for the river levee soil, especially if contaminated with heavy crude and without added nutrients, but moderate to null in the other river levee soils studied, and practically null in the clayey floodable soil. Considering both of these parameters, we can conclude that the sandy soil was very affected, the river levee soil moderately affected (but still with some potential problems) and the clayey, floodable soil, basically not affected, principally due to its low-lying aspect in the landscape and very humid to flooded conditions year-round [57].

### 3.5 Toxicity

In these tests, no mortality was observed and very little signs of stress, with only a slight loss of biomass (overall weight). Thus, even though the hydrocarbon concentration was not reduced to really low levels, the acute toxicity due to hydrocarbons was essentially eliminated (Table S6). However, this is not to say that the conditions would be adequate and favorable for the biota in general on a longer time scale, especially considering the findings of the field capacity reduction and water repellency. It is possible that the soil would not be toxic, but could not retain sufficient moisture to maintain some of the more sensitive soil fauna, especially earthworms, nematodes, and the fine roots of some plants.

### 3.6 Soil Odor Perception

In practice, personnel in remediation companies, oil companies, government authorities and affected land owners often use soil smell to gauge the degree of hydrocarbon contamination in soil and remediation effectiveness. This is often done as a field test in lieu of more costly and longer chemical analysis, even though in Mexico, as in almost all other countries, there is no legal framework to evaluate the results of the smell test. This is for several reasons, among which it is generally considered to be difficult to measure something as subjective as smell [58]. In addition to smell, there are a few other extra-official criteria that are used to evaluate soil contamination/remediation, such as the absence of an oily sheen in puddles when it rains, and the growth of vegetation (especially pastures) post-remediation.

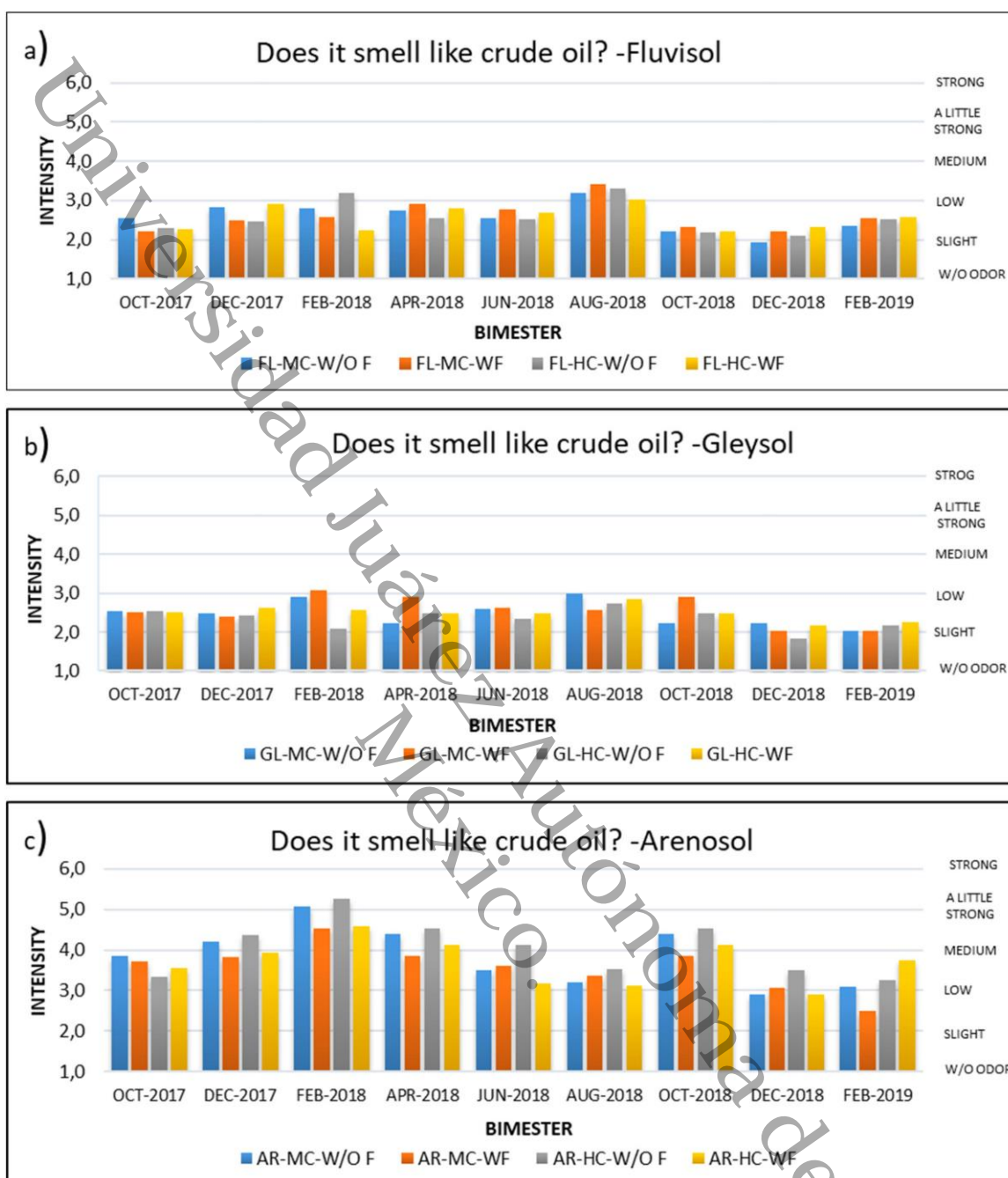
For the soil odor perception tests, there was one question on intensity (“Does it smell like crude oil?”) that was graded according to a scale, ranging from “no odor” (level 1), to “very strong odor” (level 7). Likewise, the panelists were asked to respond to an acceptability question (“It is pleasant, or unpleasant?”) according to a scale from “very pleasant” (level 1) to “very unpleasant” (level 7), (Table 2). According to this scale, an intensity of 3 or less was generally considered to be satisfactory and a level of acceptance of 4 or less (neither pleasant nor unpleasant—neutral) was considered to be acceptable. In addition, a question was

presented with respect to if the panelist considered the soil to be apt for planting vegetation (yes/no).

**Table 2.** Criteria and values for odor perception.

Odor intensity		Acceptance level for odor	
Does it smell like crude oil?		Is it pleasant or unpleasant?	
Criterion	Value	Criterion	Value
Without odor	1	Very pleasant	1
Slight odor (barely perceptible)	2	Medium pleasant	2
Low odor	3	A little pleasant	3
Medium odor	4	Neither pleasant nor unpleasant	4
Odor a little strong	5	A little unpleasant	5
Strong odor	6	Medium unpleasant	6
Very strong odor	7	Very unpleasant	7

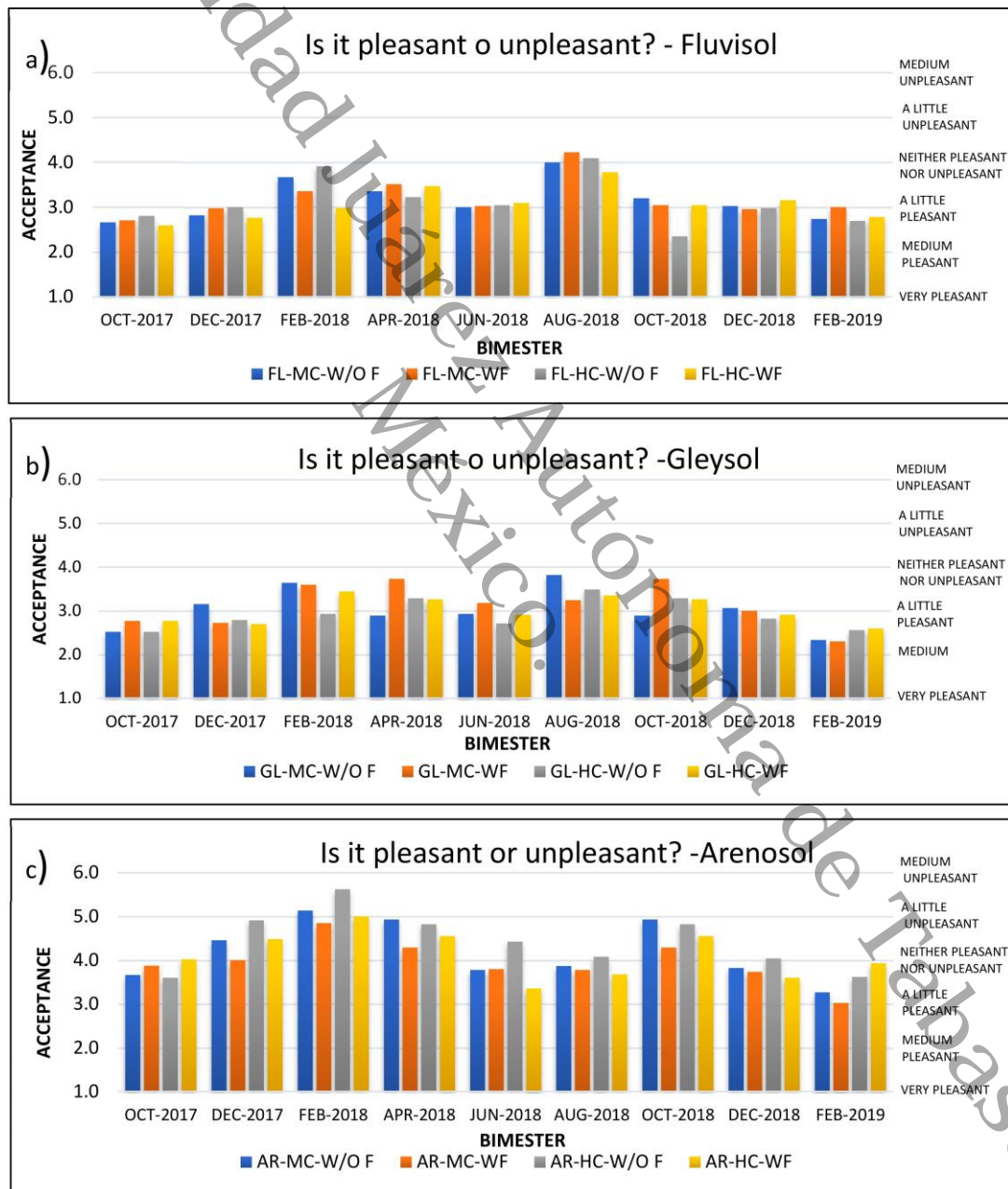
Nine odor perception tests were conducted during the 18 month study. The results of the intensity values are shown in Figure 2. In the Fluvisol and Gleysol samples, the average intensity was almost always “low” or less, and varied slightly during the treatment, generally being a little lower in Gleysol than in Fluvisol. The final values for the Gleysol samples were slightly less than those reported during the test. For both soils, the final intensity values were in the “slight” to “low” range (values of 1–2). However, in the Arenosol samples, the intensity values were more variable, generally ranging from “slight” to “a little strong” and with a tendency to reduce the intensity in the later bimesters of the treatments. These differences between Gleysol, Fluvisol and Arenosol may have to do with the amount of and type of fine particles in the soils. In general, the Gleysols in this region have a high quantity of fine particles (approx. 60–70%), mostly made of smectite clays, while Fluvisols have less, and Arenosols generally have less than 3% fine particles [23]. These fine clays have a large amount of surface area and are able to adsorb contaminants, such as hydrocarbons [33], thereby reducing their bioavailability, leachate potential, and consequently, smell. Thus, the soil with the greatest amount of fine clays has the lowest hydrocarbon smell and the soil with the lowest amount of fine clays has the highest hydrocarbon smell.



**Figure 2.** Intensity of petroleum odor in soil. **a)** In Fluvisol, **b)** in Gleysol, **c)** in Arenosol. Values are averages of three replicates. FL = Fluvisol; GL = Gleysol; AR = Arenosol; MC = Medium Crude Oil; HC = Heavy Crude Oil; W/O F = Without Fertilizer; WF = With Fertilizer.

Likewise, with respect to acceptability (Figure 3), the Fluvisol and Gleysol samples generally had low values, for the most part less than neutral (value of 4), with the average values in the Fluvisol usually being a little higher than in the Gleysol. The final acceptability values for these soils were in the “slightly pleasant” to “medium pleasant” range, all considered to be acceptable. Meanwhile, the acceptability in the Arenosol samples was more variable and higher, for the most part in the “slightly pleasant” to “slightly unpleasant” range. Only in the last bimester did the average values consistently fall at or below the acceptable

range, “neither pleasant nor unpleasant”. These tendencies (low values for Fluvisol and Gleysol, with Fluvisol being a little higher, and much higher values for the Arenosol), are consistent with those observed for intensity and probably related to the same mechanism previously explained. It is noteworthy that although the Arenosol generally had higher values (lower acceptance), even this soil was considered acceptable at the end of the treatment. It should be mentioned though, that these are all average values, and individual values may change according to personal criteria and ability to perceive odors.



**Figure 3.** Acceptance level for odor in soil. **a)** In Fluvisol, **b)** in Gleysol, **c)** in Arenosol. Values are averages of three replicates. FL = Fluvisol; GL = Gleysol; AR = Arenosol; MC = Medium Crude Oil; HC = Heavy Crude Oil; W/O F = Without Fertilizer; WF = With Fertilizer.

Crude oil tends to have a peculiar odor that depends on the composition of hydrocarbons in the oil, as well as the amount of sulfur containing compounds [59]. These kinds of odor can be detected by human smell, even in low concentrations in the air [10,11]. With respect to odors, the Mexican environmental legislation only makes reference to contamination by bad odors, without giving more relevance to this issue, and certainly not quantifying the odor.

The General Law on Ecological Equilibrium and Protection of the Environment [1] establishes in Article 5 that the federation has competence (legal authority) to regulate on the prevention of contamination of odors. Furthermore, Article 7 establishes the states as responsible for the prevention and control of generalized contamination caused by the emission of odors that are noxious and generated by fixed sources (such as industrial installations) as well mobile sources, and that are not of federal competence.

### *3.7 Relationship between Smell, Soil Fertility and Toxicity*

By use of inferential statistics, the possibility that there exists some relationship between smell intensity/acceptance (as dependent-ordinal variables) and the fertility parameters such as hydrocarbon concentration, field capacity, and water repellency (as independent-ratio variables) was analyzed. Given the data's non-parametric characteristic, the statistical method via Spearman's rho was employed, using the IBM software SPSS Statistics 20 [60]. According to the results of this analysis, it was determined that the relationships between smell and fertility factors were minimal. The values for Spearman's rho were highly irregular, generally low and in some cases, inverse of what might be expected. (Table 3). For example, with respect to the hydrocarbon concentration vs. smell, the Spearman's rho values for TPH vs. smell intensity ranged from 0.217 to 0.619 in all of the soils, and for TPH vs. smell acceptance the values ranged from -0.167 to 0.577. For field capacity vs. smell intensity, Spearman's rho values ranged from -0.424 to 0.617, and compared to smell acceptance the values ranged from -0.489 to 0.594. Likewise, for water repellency (severity), the values for Spearman's rho ranged from -0.043 to 0.800 for smell intensity and from -0.202 to 0.544 for smell acceptance. As seen from these low and even inverse values, smell is not strongly related to these fertility parameters in soil in any reliable way.

**Table 3.** Correlations of odor perception with Total Petroleum Hydrocarbons (TPH), Field Capacity and Water repellency.

Sample	Spearman's Rho Correlations					
	TPH		Field Capacity		Repellency (MED)	
	Intensity	Acceptance	Intensity	Acceptance	Intensity	Acceptance
FLMC-W/O F	0.500	-0.167	0.250	0.317	0.617	0.500
FLMC-WF	0.217	-0.133	0.617	0.467	0.330	0.317
FLHC-W/O F	0.267	0.450	-0.151	-0.176	0.333	0.517
FLHC-WF	0.333	-0.083	0.276	0.042	0.800**	0.317
GLMC-W/O F	0.360	0.092	0.326	0.025	0.122	0.021
GLMC-WF	0.395	0.151	0.353	0.594	-0.043	-0.153
GLHC-W/O F	0.377	-0.008	-0.105	-0.088	0.201	-0.134
GLHC-WF	0.509	0.286	-0.426	-0.489	0.153	-0.202
ARMC-W/O F	0.619	0.285	0.276	0.460	0.569	0.251
ARMC-WF	0.577	0.577	0.510	0.510	0.544	0.544
ARHC-W/O F	0.467	0.460	-0.159	-0.391	0.250	0.209
ARHC-WF	0.385	0.435	-0.424	-0.256	0.385	0.351

\*\* unique direct correlation with high intensity.

As previously stated, with respect to acute toxicity by direct soil contact, no mortality nor high stress factors (such as expulsion of coelomic/bloody fluid, inflammation of the clitellus) were observed, only slight reduction in biomass, which was similar in the three soils studied. It is worth mentioning that during this direct contact bioassay, it is important to control humidity so that the test organism does not dehydrate during the test period. It appears that the level of degradation that occurred in the treatments after 18 months was able to reduce the toxicity of the hydrocarbons in the soil. This was congruent with the perception of smell in terms of intensity and acceptance. Thus, when the perception of soil odor was considered acceptable (level 4, neither pleasant nor unpleasant—neutral), the soil really did appear to be free of acute toxicity. This is reasonable, considering that for most mammals, including humans, taste and smell are used to identify and avoid hazardous substances, such as naturally occurring hydrogen sulfide from sulfur springs, some poisonous plants, and potentially pathogen-containing materials, like decomposed food stuffs and feces. This is also reasonable considering that crude petroleum is a naturally occurring substance and that it is found at the earth's surface in petroleum seeps (tar pits).

In Tables 4–6, a summary of data is presented relevant to the ability to use smell to determine if a petroleum-contaminated soil has been adequately remediated. This is based on the research question: when they say “it is good to plant”, is it really satisfactory? For this purpose, final values (after treatment) were included on water repellency (severity and persistence), field capacity, and toxicity and compared to the odor intensity and acceptance.

For the river levee soil (Fluvisol), the fertility parameters evaluated in the laboratory indicate that even after treatment, there may be problems with the soil–water relationship.

This soil still presented water repellence severity in the range of moderate to very severe and a persistence from strong to extreme. As mentioned previously, is it probable that under field conditions, the *in situ* moisture content never drops below the critical moisture content. Thus, in the field, it is improbable that this soil would manifest soil water repellency [29,33]. Nonetheless, there was still the issue of a reduced field capacity. Even after treatment, the field capacity was still 28.3% to 43.5% less than in uncontaminated soil. Accordingly, it is unlikely that the soil recovered its fertility completely. Consequently, with respect to fertility, smell is not reliable (presents false positives).

In contrast to fertility, in the Fluvisol, the treatments (either by passive bioremediation or natural attenuation) did result in the reduction of acute toxicity to levels in which there was no mortality nor signs of stress to the test organism. In these (final) samples, both the levels of smell intensity and acceptance were satisfactory. Thus, the research question: when they say “it is good to plant”, is it really satisfactory, at least with respect to toxicity, is affirmative. No false positives were found (with acceptable smell but toxic conditions). Thus, it should be safe to let animals graze, but due to poor field capacity, there may not be enough moisture to maintain the pasture. If post-remediation, some steps were made to increase field capacity (by addition of organic amendments, for example), it is possible that the soil could recover. If under these conditions, in addition to smell, tests were also run to assess a recovered field capacity, this might be sufficient to confirm site remediation and adequate restoration. The results in the clayey floodable soil (Gleysol) were similar to the Fluvisol with respect to toxicity—no false positive were found (Table 5). With respect to the soil–water relationship, however, the situation is more complex. As mentioned previously, due to the low-lying nature of this soil, it is flooded or humid year round, and the water repellency data generated in the laboratory are probably not relevant to the conditions in the field. It is very unlikely that this soil would suffer from insufficient moisture, even during the driest part of the year. Consequently, the fertility question, with respect to water repellency or field capacity, becomes moot. Only the toxicity question remains, and in this case, as in the Fluvisol, there were no false positives. Thus, it appears that for Gleysols, at least those with similar conditions to this one (clayey, alluvial, smectite-rich soil, in a tropical-monsoon climate), smell may be a reliable criteria for judging the acceptability of a remediation project. When the smell is acceptable, there is no acute toxicity, and allowing cattle to graze should be all right.



**Table 4.** Evaluation: when they say “it is good to plant”, is it really satisfactory?—Fluvisol.

Sample	Soil Parameters						Odor				Is it good to plant?					False positives	
	Water Repellency				% Reduction in Field Capacity	Toxicity % Mortality	Intensity		Acceptance		Soil Parameters			Odor perception			
	Severity		Persistence				value	Classifica-tion	value	Classifica-tion	REP.	F.C.	TOX.	Intensity	Accept.	TOX.	FERT.
	MED	Classifi-cation	WDPT (s)	Classifi-cation													
FLMC-W/O F	2.11	Moderate	209.50	Strong	38.35	0	2.36	Slight-low	2.73	Medium Pleasant – A little pleasant	Yes*	No	Yes	Yes	Yes	No	Yes
FLMC-WF	2.81	Severe	>3,600	Extreme	43.54	0	2.56	Slight-low	3.00	A little pleasant	Yes*	No	Yes	Yes	Yes	No	Yes
FLHC-W/O F	3.46	Very severe	609.59	Severe	42.73	0	2.51	Slight-low	2.69	Medium Pleasant – A little pleasant	Yes*	No	Yes	Yes	Yes	No	Yes
FLHC-WF	3.76	Very severe	>3,600	Extreme	28.30	0	2.58	Slight-low	2.78	Medium Pleasant – A little pleasant	Yes*	No	Yes	Yes	Yes	No	Yes

REP. = Repellency, F.C. = Field Capacity, TOX. = Toxicity, FL = Fluvisol, MC = Medium Crude Oil, HC = Heavy Crude Oil, W/O F = Without Fertilizer, WF = With Fertilizer. \* At field conditions, these are probably not repellent, Accept. = acceptance, FERT. = Fertility.

**Table 5.** Evaluation: When they say “it is good to plant”, is it really satisfactory?—Gleysol.

Sample	Soil Parameters						Odor				Is it good to plant?					False positives	
	Water Repellency				% Reduction in Field Capacity	Toxicity % Mortality	Intensity		Acceptance		Soil Parameters			Odor perception			
	Severity		Persistence				Value	Classifica-tion	Value	Classification	REP.	F.C.	TOX.	Intensity	Accept.	TOX.	FERT.
	MED	Classifi-cation	WDPT (s)	Classifi-cation													
GLMC-W/O F	0.00	Not repellent	12.83	Slight	56.03	0	2.02	Slight-low	2.33	Medium pleasant-A Little pleasant	Yes	No	Yes	Yes	Yes	No	N.A.
GLMC-WF	0.00	Not repellent	25.33	Slight	51.35	0	2.02	Slight-low	2.30	Medium pleasant- A Little pleasant	Yes	No	Yes	Yes	Yes	No	N.A.
GLHC-W/O F	0.62	Low	89.04	Strong	44.51	0	2.18	Slight-low	2.56	Medium pleasant-A Little pleasant	Yes	No	Yes	Yes	Yes	No	N.A.
GLHC-WF	2.00	Moderate	246.76	Strong	39.46	0	2.27	Slight-low	2.60	Medium pleasant-A Little pleasant	Yes*	No	Yes	Yes	Yes	No	N.A.

REP. = Repellency, F.C. = Field Capacity, TOX. = Toxicity, GL = Gleysol, MC = Medium Crude Oil, HC = Heavy Crude Oil, W/O F = Without Fertilizer, WF = With Fertilizer. N.A. = Does not apply. In the field these soils retain abundant moisture (>80% Field Capacity). \* At field conditions, these are probably not repellent, Accept. = acceptance, FERT. = Fertility.

**Table 6.** Evaluation: when they say “it is good to plant”, is it really satisfactory? Arenosol.

Sample	Soil Parameters						Odor				Is it good to plant?					False positives	
	Water Repellency				% Reduction in Field Capacity	Toxicity % Mortality	Intensity		Acceptance		Soil Parameters			Odor perception			
	Severity		Persistence				value	Classifica-tion	value	Classification	REP.	F.C.	TOX.	Intensity	Accept.	TOX.	FERT.
	MED	Classifi-cation	WDPT (s)	Classifi-cation													
ARMC-W/O F	5.34	Very severe	>3,600	Extreme	48.93	0	3.09	Low-medium	3.27	A little pleasant- Neither pleasant nor unpleasant	No	No	Yes	No	Yes	No	Yes
ARMC-WF	5.12	Very severe	>3,600	Extreme	58.82	0	2.49	Slight-Low	3.02	A little pleasant- Neither pleasant nor unpleasant	No	No	Yes	No	Yes	No	Yes
ARHC-W/O F	5.46	Very severe	>3,600	Extreme	23.23	0	3.24	Low-medium	3.62	A little pleasant- Neither pleasant nor unpleasant	No	No	Yes	No	Yes	No	Yes
ARHC-WF	5.34	Very severe	>3,600	Extreme	19.90	0	3.73	Low-medium	3.93	A little pleasant- Neither pleasant nor unpleasant	No	No	Yes	No	Yes	No	Yes

Among the three soils studied, the sandy soil (Arenosol) was the most divergent. With a very low quantity of fine particles, it is likely to present greater bioavailability of the contaminants, and consequently, greater smell intensity, and less acceptability. During most of the treatment period the smell acceptability was unsatisfactory. However, in the final bimester, the acceptability was reliably satisfactory. This was consistent with the toxicity data (no false positives). Thus, when the smell was acceptable, the toxicity was also null. However, with respect to fertility, the situation was even more extreme than in the Fluvisol. The final samples of the Arenosol all had a reduced field capacity from 20 to 59 % less, the water repellency severity was classified as “very severe” and the persistence was classified as “extreme”. Thus, even though the smell was acceptable, the water repellency and field capacity were affected—all false positives. In this soil more than any other, smell was inadequate to evaluate the effectiveness of remediation. Even if the soil was not toxic, the soil–water relationship was very heavily affected.

#### 4. Conclusions

In this study, the simulation of bioremediation and natural attenuation resulted in the reduction in the hydrocarbon concentration in the soil to levels very near the Maximum Permissible Limit according to Mexican environmental norm. However, not all soils recovered their fertility, especially with respect to field capacity in those soils with medium to coarse textures. Nonetheless, upon finalizing the treatment period, acute toxicity was not encountered in any of the soils. With respect to the perception of soil odor, the intensity for the Fluvisol and Gleysol were generally perceived to be between slight to low, but in the sandy soil (Arenosol) it was generally between low to medium. Regarding smell acceptance, the Fluvisol and Gleysol had generally pleasant levels even during the remediation, while the Arenosol generally had unsatisfactory levels during the remediation. However, upon finishing the remediation treatment period, all the soils studied had satisfactory levels of smell intensity and acceptance. Considering these results, soil smell can be considered to be a reliable criterion for evaluating acute toxicity in these soils, and probably reliable for evaluating fertility in the Gleysol. However, in the Fluvisol and Arenosol, this criteria by itself would not be reliable for evaluation of soil fertility and should be avoided.

**Supplementary Materials:** The following are available online at <http://www.mdpi.com/1660-4601/17/9/3213/s1>, Figure S1: Experimental design, Figure S2: Form used in the olfactory perception test, Figure S3: Acceptance form for participation in an investigation, Figure S4:

Panelist data sheet, Figure S5: TPH degradation in contaminated soils with medium crude oil without fertilizer, Figure S6: TPH degradation in contaminated soils with medium crude oil with fertilizer, Figure S7: TPH degradation in contaminated soils with heavy crude oil without fertilizer, Figure S8: TPH degradation in contaminated soils with heavy crude oil with fertilizer, Figure S9: Field capacity in contaminated soils with medium and heavy crude oil, Table S1: Characterization of uncontaminated soils, Table S2: Initial fertility parameters in contaminated soils, Table S3: Classification of the severity of water repellency evaluated by the MED method and expressed as molarity, proposed by King (1981), Table S4: Classification of the WDPT proposed by Dekker and Jungerius, Table S5: Repellency (MED y WDTP) in contaminated soils treated by bioremediation and natural attenuation for 18 months, Table S6: Weight loss of organisms in acute toxicity tests by direct contact, Text: Project Ethics Details.

**Funding:** This project was funded by the Laboratorio de Remediación of the Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (DACBiol/LR/2017.01).

**Acknowledgments:** We would like to thank the employees of the maintenance department of the university as well as the environmental engineering students for their free participation as panelist in this study. Also, the Remediation Laboratory of the Universidad Juárez Autónoma de Tabasco for support with instruments, materials and transportation.

## References

1. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. *Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (General Law of Ecological Balance and Environmental Protection)*; Diario Oficial de la Federación: México City, Mexico, 2018.
2. Adams, R.H.; Álvarez-Ovando, A.; Castañón, N.G. Efecto de la concentración de hidrocarburos sobre la producción del pasto (*Brachiaria humidicola*) en Texistepec, Veracruz (Effect of hydrocarbon concentration on pasture production (*Brachiaria humidicola*) in Texistepec, Veracruz). *Phyton Int. J. Exp. Bot.* 2015, *84*, 222–232.
3. Cuevas-Díaz, M.D.C.; Reyes Espinosa, G.; Hernández Ilizaliturri, C.A.; Cantú Mendoza, A. *Métodos Ecotoxicológicos Para la Evaluación de Suelos Contaminados con Hidrocarburos (Ecotoxicological Methods for the Evaluation of Soils Contaminated with Hydrocarbons)*; Instituto Nacional de Ecología (INE): México City, Mexico, 2012.
4. Adams, R.H.; Zavala-Cruz, J.; Morales-García, F.A. Concentración residual de hidrocarburos en suelo del trópico. II: *Afectación a la fertilidad y su recuperación (Residual concentration of hydrocarbons in tropic soil. II: Impairment of fertility and its recovery)*. *Interciencia* 2008, *33*, 483–489.
5. Domínguez-Rodríguez, V.I.; Adams, R.H.; Vargas-Almeida, M.; Zavala-Cruz, J.; Romero-Frasca, E. Fertility Deterioration in a Premeditated Petroleum-Contaminated Soil. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2020, *17*, 382. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
6. De la Cruz Morales, L.A. Evaluación Integral y Sistemática de la Contaminación de un Suelo Acrisol con Petróleo Crudo. (Tesis de Licenciatura). Integral and Systematic Evaluation of Contamination in an Acrisol soil with Crude Petroleum. Bachelor's Thesis, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, División Académica de Ciencias Biológicas, México City, Mexico, 2014.
7. Trujillo-Narcia, A.; Rivera-Cruz, M.C.; Lagunes-Espinoza, L.C.; Palma-López, D.J.; Soto-Sánchez, S.; Ramírez-Valverde, G. Efecto de la restauración de un fluvisol contaminado con petróleo crudo (Effect of the restoration of a fluvisol contaminated with crude oil). *Rev. Int. Contam. Ambient.* 2012, *28*, 360–374.
8. Discovery-Channel. Recuperación de Suelos, ¿Cómo Lo Resuelven? Documental film about the remediation of the 18 de Marzo oil refinery in Mexico City. Discovery Networks Latin America, 25 Noviembre 2007. Available online: <https://www.youtube.com/watch?v=rl6fk40GnRc> (accessed on 4 November 2018).
9. Rodríguez-Gil, G. El poderoso sentido del olfato (The powerful sense of smell). *Resources* 2004, *11*, 1–3.

10. Toro Gómez, M.V. *Métodos Para el Monitoreo de Olores Ofensivos (Methods for Monitoring Offensive Odors)*; Universidad Pontificia Bolivariana: Medellín, Colombia, 2013.
11. Baena, S.; Hernández, L. *Análisis de la Regulación Colombiana en Materia de Olores Ofensivos (Analysis of Colombian Regulation Regarding Offensive Odors)*; Universidad de Medellín: Medellín, Colombia, 2012.
12. Iglesias-García, A.R. Contaminación Atmosférica por Olores: Unas Técnicas de Medida Avanzadas y una Legislación Específica Inexistente (Air Pollution by Odors: Advanced Measurement Techniques and Non-Existent Specific Legislation). Available online: [http://blog.condorchem.com/pdf/ponencia\\_olors\\_conama9.pdf.2017](http://blog.condorchem.com/pdf/ponencia_olors_conama9.pdf.2017) (accessed on 23 October 2018).
13. Eltarkawe, M.A.; Miller, S.L. The impact of industrial odors on the subjective well-being of communities in Colorado. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2018, *15*, 1091. [CrossRef]
14. Eltarkawe, M.A.; Miller, S.L. Industrial odor source identification based on wind direction and social participation. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2019, *16*, 1242. [CrossRef]
15. Ramos-Rincón, M.; Bermudez, A.; Rojas, T. *Contaminación Odorífera: Causas, Efectos y Posibles Soluciones a una Contaminación Invisible (Odor Pollution: Causes, Effects and Possible Solutions to Invisible Pollution)*; RIAA: Washington, DC, USA, 2018; Volume 9, p. 4.
16. Sáenz, L.E.; Zambrano, D.A.; Calvo, J.A. Percepción comunitaria de los olores generados por la planta de tratamiento de aguas residuales de El Roble-Puntarenas, Costa Rica (Community perception of odors generated by the El Roble-Puntarenas wastewater treatment plant, Costa Rica). *Tecnol. Marcha* 2016, *29*, 137–149. [CrossRef]
17. Noguera, K.; Olivero, J. Los rellenos sanitarios en Latinoamérica: Caso colombiano (Sanitary landfills in Latin America: Colombian case). *Rev. Acad. Colomb. Cienc. Exactas Físicas Nat.* 2010, *34*, 347–356.
18. Sakawi, Z.; Sharifah, S.; Jaafar, O.; Mahmud, M. Community perception of odor pollution from the landfill. *Res. J. Environ. Earth Sci.* 2011, *3*, 142–145.
19. Carolan, M.S. When good smells go bad: A sociohistorical understanding of agricultural odor pollution. *Environ. Plan. A* 2008, *40*, 1235–1249. [CrossRef]
20. Coma, J.; Bonet, J.; Companys, G.V. Producción ganadera y contaminación ambiental (Livestock production and environmental pollution). In *XX Curso de Especialización FEDNA: Avances en Nutrición y Alimentación Animal*; Fira de Barcelona: Barcelona, Spain, 2004; pp. 237–272.
21. Zarra, T.; Naddeo, V.; Belgiorno, V. A novel tool for estimating the odour emissions of

- composting plants in air pollution management. *Glob. Nest J.* 2009, 11, 477–486.
22. Murguía, W. Contaminación por olores: El nuevo reto ambiental (Odor pollution: The new environmental challenge). *Gac. Ecológica Inst. Nac. Ecol. Secr. Medio Ambiente Recur. Nat.* 2007, 82, 49–53.
  23. Palma-López, D.J.; Cisneros, D.J.; Moreno, C.; Rincón-Ramírez, J.A. *Suelos de Tabasco: Su uso y Manejo Sustentable*; Colegio de Postgraduados-ISPROTAB-FUPROTAB: Villahermosa, Mexico, 2007; Volume 195.
  24. Zavala-Cruz, J.; García-López, E. *Suelo y Vegetación de la Cuenca Baja del Río Tonalá, Tabasco*; Publicación especial del Colegio de Postgraduados; Campus Tabasco H. Cárdenas: Tabasco, Mexico, 2012.
  25. IUSS Working Group WRB. *World Reference Base for Soil Resources 2014, International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps*; World Soil Resources Reports No. 106; FAO: Rome, Italy, 2015.
  26. Salehi, M.H. Challenges of Soil Taxonomy and WRB in classifying soils: Some examples from Iranian soils. *Phys. Geogr. Ser.* 2018, 14, 63–70. [[CrossRef](#)]
  27. Soil Survey Staff. *Keys to Soil Taxonomy (Claves Para la Taxonomía de Suelos)*; Natural Resources Conservation Service, Agriculture Department: Washington, DC, USA, 2014; p. 360.
  28. Porta, J.; Lopez Acevedo, M.; Poch, R. *Edafología: Uso y Protección de Suelos (Edaphology: Use and Protection of Soils)*, 3rd ed.; Mundi-Prensa: Madrid, Spain, 2014.
  29. Adams, R.H.; Guzmán-Osorio, F.J.; Zavala-Cruz, J. Water repellency in oil contaminated sandy and clayey soils. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 2008, 5, 445–454. [[CrossRef](#)]
  30. Morales-Bautista, C.M.; Adams, R.H.; Hernández-Barajas, J.R.; Lobato-García, C.E.; Torres-Torres, J.G. Characterization of fresh and weathered petroleum for potential impacts to soil fertility. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 2016, 13, 2689–2696. [[CrossRef](#)]
  31. American Society for Testing and Materials. *Standard Guide for Use of the Petroleum Measurement Tables*; ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2013; pp. 1–7.
  32. Guzmán-Osorio, F.; Adams, R.H.; Domínguez-Rodríguez, V.; Lobato-García, C.; Guerrero-Peña, A.; Barajas-Hernández, J.; Baltierra-Trejo, E. Alternative method for determining API degrees of petroleum in contaminated soil by FTIR. *Egypt. J. Pet.* 2020, 29, 39–44. [[CrossRef](#)]
  33. Marín-García, D.C.; Adams, R.H.; Hernández-Barajas, R. Effect of crude petroleum on water repellency in a clayey alluvial soil. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 2016, 13, 55–64. [[CrossRef](#)]

34. Adams, R.H.; Domínguez Rodríguez, V.I.; Carrillo, L.V. Evaluation of microbial respiration and ecotoxicity in contaminated soils representative of the petroleum producing region of southeastern Mexico. *Terra Latinoam.* 2002, 20, 253–265.
35. Corona-Ramírez, L.; Iturbe-Argüelles, R. Atenuación natural en suelos contaminados con hidrocarburos (Natural attenuation in soils contaminated with hydrocarbons). *Ing. Investig. Tecnol.* 2005, 6, 119–126.
36. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. *Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000 Que Establece las Especificaciones de Fertilidad, Salinidad y Clasificación de Suelos. Estudios, Muestreo y Análisis*; Diario Oficial: México City, Mexico, 2002.
37. Domínguez, R.I.; Aguilera, H. *Metodología de Análisis Físico-Químicos de Suelos (Methodology for Physical-Chemical Analysis of Soils)*, 1st ed.; Universidad Nacional Autónoma de México: Mexico City, Mexico, 1989.
38. Lal, R.; Shukla, M.K. *Principles of Soil Physics*; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2004.
39. Kirkham, M.B. *Principles of Soil and Plant Water Relations*; Elsevier Science: San Diego, CA, USA, 2005.
40. Zavala-Cruz, J.; Gavi-Reyes, F.; Adams, R.H.; Ferrera-Cerrato, R.; Palma-López, D.J.; Vaquera-Huerta, H.; Domínguez-Ezquivel, J.M. Derrames de petróleo en suelos y adaptación de pastos tropicales en el Activo Cinco Presidentes, Tabasco, México (Oil spills in soils and adaptation of tropical pastures in the Active Five Presidents, Tabasco, Mexico). *Terra Latinoam.* 2005, 23, 293–302.
41. Litvina, M.; Todoruk, T.R.; Langford, C.H. Composition and structure of agents responsible for development of water repellency in soils following oil contamination. *Environ. Sci. Technol.* 2003, 37, 2883–2888. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
42. Dekker, L.W.; Jungerius, P.D. Water repellency in the dunes with special reference to the Netherlands. *Catena Suppl.* 1990, 18, 173–183.
43. Dlapa, P.; Doerr, S.; Lichner, L.; Šír, M.; Tesar, M.J.P. Soil, and Environment, Alleviation of soil water repellency: Effect of kaolinite and Ca-montmorillonite. *Plant Soil Environ.* 2004, 50, 358–363. [[CrossRef](#)]
44. Guzmán-Osorio, F.J.; Adams, R.H. Mitigation of water repellency in the treatment of contaminated muds using the chemical–biological stabilization process. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 2015, 12, 2071–2078. [[CrossRef](#)]
45. Environmental Protection Agency (EPA). *Method 428.1. Petroleum Hydrocarbons, Total Recoverable. Spectrophotometric Infrared*; United States Environmental Protection Agency:



Washington, DC, USA, 1986; p. 8.

46. Mayo-López, T.M.; Adams, R.H.; Domínguez-Rodríguez, V.I.; Guzmán-Osorio, F.J. Organic amendment optimization for treatment of hydrocarbon contaminated soil using the chemicalbiological stabilization process. *Afr. J. Biotechnol.* 2010, *9*, 7079–7085.
47. Adams, R.H.; Guzmán-Osorio, F.J. Evaluation of land farming and chemico-biological stabilization for treatment of heavily contaminated sediments in a tropical environment. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 2008, *5*, 169–178. [[CrossRef](#)]
48. Domínguez-Rodríguez, V.I.; Adams, R.H.; Sánchez-Madrigal, F.; Pascual-Chablé, J.D.L.S.; Gómez-Cruz, R. Soil contact bioassay for rapid determination of acute toxicity with *Eisenia foetida*. *Heliyon* 2020, *6*, e03131. [[CrossRef](#)]
49. OECD. *Organization for Economic Cooperation and Development. Earthworm, Acute Toxicity Tests. OECD Guideline for Testing of Chemicals*; OECD: Paris, France, 1984; Volume 207.
50. International Organization for Standardization (ISO). Sensory Analysis—General Guidance for the Design of Test Rooms. In *Standard ISO 8589:2010/A1:2014*; ISO: Geneva, Switzerland, 2014.
51. Sanz Castrodeza, E. Comparación de Metodologías Bidimensionales en Análisis Sensorial (Tesis de Maestría). Comparison of Two-Dimensional Methodologies in Sensory Analysis. Master's Thesis, Universidad de Valladolid, Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias, Palencia, Spain, 2018.
52. Lotufo, H.A.; Mamaní, A.R.; González, L.E.; Cravero Bruneri, A.P. Composición físico-química y evaluación sensorial de una pasta rellena fresca dietética con adición de fibra prebiótica (Physical-chemical composition and sensory evaluation of a fresh dietary stuffed pasta with the addition of prebiotic fiber). *Diaeta Ciudad. Autónoma Buenos Aires* 2015, *33*, 31–37.
53. Watts, B.M.; Ylimaki, G.L.; Jeffery, L.E.; Elías, L.G. *Métodos Sensoriales Básicos Para la Evaluación de Alimentos (Basic Sensory Methods for Food Evaluation)*; CIID: Ottawa, ON, CA, 1992.
54. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. *Norma Oficial Mexicana NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012 Que Establece los Límites Máximos Permisibles de Hidrocarburos en Suelos y las Especificaciones Para su Caracterización y Remediación*; Diario Oficial de la Federación: México City, Mexico, 2013.
55. Jaramillo, J. Repelencia al agua en suelos: Una síntesis (Water repellency in soils: A synthesis). *Rev. Acad. Colomb. Cienc* 2006, *30*, 215–232.
56. Adams, R.H.; Cerecedo-López, R.A.; Alejandro-Álvarez, L.A.; Domínguez-Rodríguez, V.I.;

- Nieber, J.L. Treatment of water-repellent petroleum-contaminated soil from Bemidji, Minnesota, by alkaline desorption. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 2016, *13*, 2249–2260. [[CrossRef](#)]
57. Álvarez-Coronel, G.; Domínguez-Rodríguez, V.I.; Adams, R.H.; Palma-López, D.J.; Zavala-Cruz, J. The role of soil clays in mitigating or exacerbating impacts to fertility in crude-oil contaminated sites. *J. Trop. Agric. Sci.* 2020.
58. Synnott, A. Sociología del olor (Sociology of smell). *Rev. Mex. Sociol.* 2003, *65*, 431–464. [[CrossRef](#)]
59. Servicio Geológico Mexicano (SGM). Características del Petróleo (Oil Characteristics). 2017. Available online: [https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Aplicaciones\\_geologicas/Caracteristicas-del-petroleo.html](https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Aplicaciones_geologicas/Caracteristicas-del-petroleo.html) (accessed on 23 October 2018).
60. Reguant-Alvarez, M.; Vilà-Baños, R.; Torrado-Fonseca, M. La relación entre dos variables según la escala de medición con SPSS (The relationship between two variables according to the measurement scale with SPSS). *REIRE Rev. D'innovació Recer. Educ.* 2018, *11*, 45–60.



© 2020 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

## Supplementary Material

### Soil odor as an extra-oficial criterion for qualifying remediation projects of crude oil-contaminated soil.

Saúl López-Aguilar<sup>1</sup>, Randy H. Adams<sup>2</sup>, Verónica I. Domínguez-Rodríguez<sup>2</sup>, José A. Gaspar-Génico<sup>2</sup>, Joel Zavala-Cruz<sup>3</sup>, Edith Hernández-Naterén<sup>3</sup>

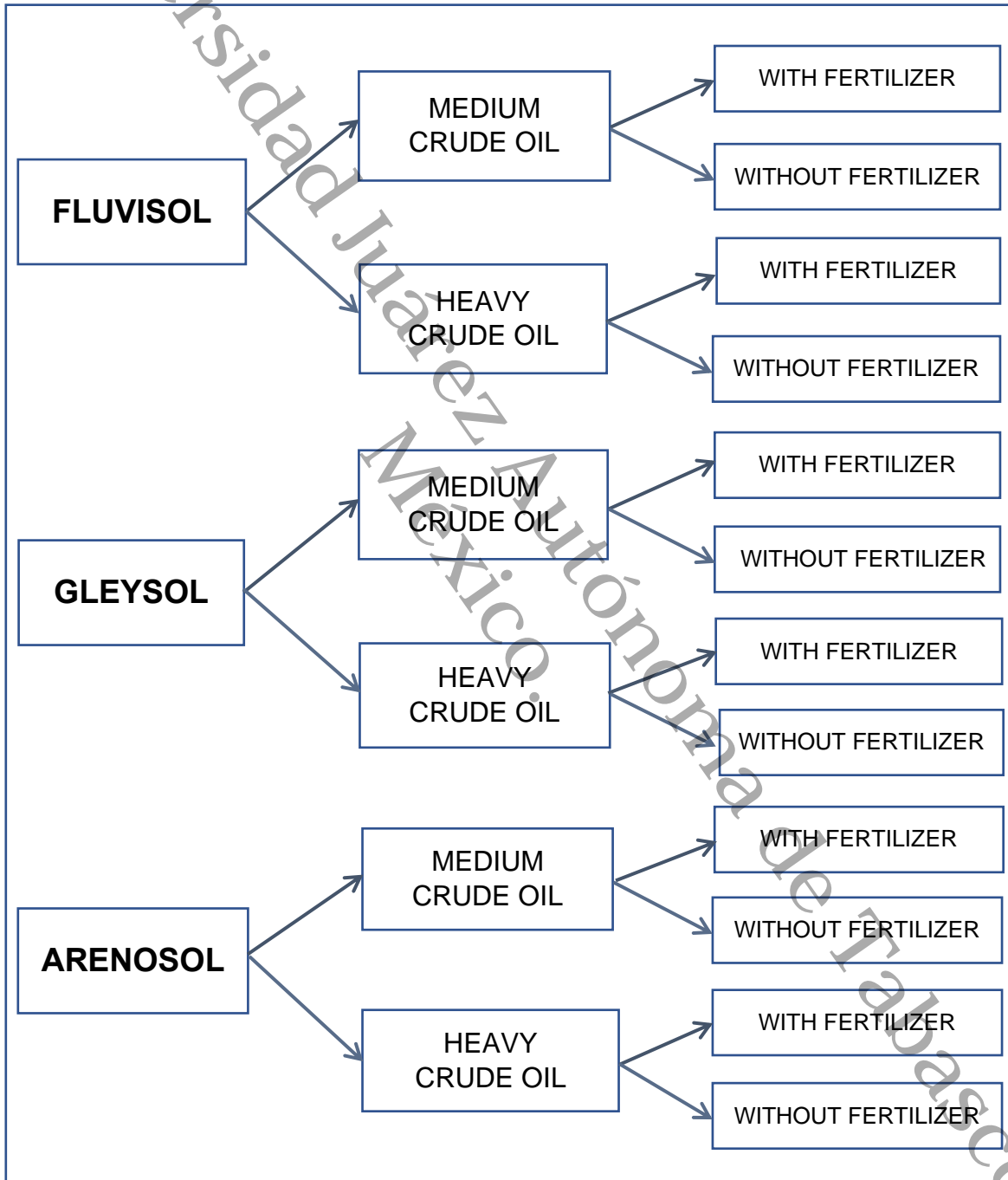


Figure S1. Experimental design.

## Project Ethics Details.

The research protocol was evaluated and approved by the Divisional Research Committee of the Biological Sciences Academic Division of the Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (Folio No. 395-2017) after considering protection to human health, dignity and scientific rigor.

Although this study did not involve clinical trials, it did involve human panelist. As such, it was felt to be important to consider some factors commonly used in clinical trials. Panelist received information previous to the test with respect to the test objectives, possible risks, test procedure, as well as the complete freedom to abandon the test at any moment if they choose to. Also, their understanding and acceptance was confirmed by a signed consent form (Figure S3, Supplementary Material). Likewise, some personal data was solicited (Figure S4, Supplementary Material). Panelist participated voluntarily, without any coercion or monetary remuneration, nor reprisal for failing to participate or withdrawing themselves from the test.

It is worth mentioning that before approval of the study, a risk evaluation was made for the panelists' exposure. The Recommended Exposure Level (REL) approved by the National Institute of Occupational Safety and Health – NIOSH [1] for a similar mixture of hydrocarbons (Kerosene), is  $100 \text{ mg m}^{-3}$ . If one considers that the average person inhales roughly  $20 \text{ m}^3$  of air a day, and that a works shift is eight hours a day, the corresponding REL in terms of milligrams of hydrocarbon inhaled per day per person =  $(20 \text{ m}^3 \text{ air}/24 \text{ h}) (8 \text{ hours}) (100 \text{ mg m}^{-3}) = 667 \text{ mg d}^{-1} \text{ person}^{-1}$  (over one-half gram per day).

The concentration and exposure time of the panelist was much less than this. The exposure to each sample was approximately 5 – 10s each, for a lot of 36 samples = 360s maximum, or less than six minutes over a test of 30-40 minutes. The vapor concentration was estimated to be less than 1/10th that of an occupational exposure based on organoleptic observations. None-the-less, if one considers a maximum concentration as high as an occupational exposure ( $100 \text{ mg m}^{-3}$ ), the daily exposure for the sum of 36 samples, in terms of milligrams of hydrocarbons inhaled per person per day =  $(20 \text{ m}^3 \text{ air}/24 \text{ h}) (\text{hr}/60 \text{ min.}) (6 \text{ min.})(100 \text{ mg m}^{-3}) = 8.3 \text{ mg d}^{-1} \text{ person}^{-1}$ , or less than 80 times the recommended exposure level.

After reviewing these data, the Divisional Research Committee and the Environmental Engineering Academic Research Group at the university considered that the risks to panelists were negligible and that the protocols were adequate to protect human health and dignity. It should also be noted that no panelist complained of symptoms typical of over-exposure to hydrocarbons by inhalation (such as nasal congestion, difficulty breathing, headache or nausea), and no panelist asked to withdraw from the test.

PRUEBA DE PERCEPCION OLFATIVA											
No. de Muestra:				Fecha:				Hora:			
Nombre:											
Instrucciones: Lea con atención cada pregunta y marque con una X el cuadro que consideres contiene la respuesta correcta											
¿Huele a tierra normal?		¿Huele a tierra buena?		Intensidad de olor ¿Huele a petróleo crudo?			Nivel de aceptación del olor ¿Es agradable o desagradable?			¿Sirve para sembrar? (está bien)	
Si	No	Si	No	Sin olor	1		Muy agradable	1		Si	No
				Olor ligero (apenas perceptible)	2		Medio agradable	2			
				Olor bajo	3		Un poco agradable	3			
				Olor mediano	4		Ni agradable ni desagradable	4			
				Olor un poco fuerte	5		Un poco desagradable	5			
				Olor fuerte	6		Medio desagradable	6			
				Olor muy fuerte	7		Muy desagradable	7			

a) – Original form

OLFACTORY PERCEPTION TEST											
Sample No.:				Date:				Time:			
Nombre:											
Instructions: Read each question carefully and mark with an X the box you consider contains the correct answer											
Does it smell like normal earth?		Does it smell good ground?		Odor intensity Does it smell like crude oil?			Acceptance level for odor Is it pleasant or unpleasant?			Does it serve to sow? (it's okay)	
Yes	No	Yes	No	Without odor	1		Very pleasant	1		Yes	No
				Slight odor (barely perceptible)	2		Medium pleasant	2			
				Low odor	3		A little pleasant	3			
				Medium odor	4		Neither pleasant nor unpleasant	4			
				Odor a little strong	5		A little unpleasant	5			
				Strong odor	6		Medium unpleasant	6			
				Very strong odor	7		Very unpleasant	7			

b) - Translated form

Figure S2. a), b) Format used in the olfactory perception test.

## FORMATO DE ACEPTACION DE PARTICIPACION EN UNA INVESTIGACION [2]

Lugar: \_\_\_\_\_ Fecha: \_\_\_\_\_

### A QUIEN CORRESPONDA

Yo \_\_\_\_\_ declaro libre y voluntariamente que acepto participar en el estudio **“Percepción olfativa como criterio para evaluar la efectividad de la restauración de suelos contaminados con petróleo crudo”** que se realizará en la Institución cuyos objetivos consisten en evaluar la efectividad de las pruebas de percepción olfativa como criterio para la valoración de las obras de restauración de suelos contaminados con petróleo crudo mediano y pesado.

Estoy consciente de que los procedimientos, pruebas y tratamientos, para lograr los objetivos mencionados consistirán en hacer una prueba de olor controlada a las muestras presentadas y que los riesgos a mi persona tienen pocas posibilidades.

Entiendo que del presente estudio se derivarán los siguientes beneficios:

- Contribuir en la generación de conocimiento mediante una publicación científica que realizará nuestra institución.
- Demostrar que la percepción olfativa es un criterio que se puede emplear en la restauración de suelos contaminados con petróleo crudo.

Es de mi conocimiento que seré libre de retirarme de la presente investigación en el momento que así yo lo desee. También que puedo solicitar información adicional acerca de los riesgos y beneficios de mi participación en este estudio. En caso de que decidiera retirarme, la atención que como trabajador (o estudiante) recibo en esta institución no se verá afectada.

Nombre \_\_\_\_\_ Firma \_\_\_\_\_  
Dirección \_\_\_\_\_  
Fecha \_\_\_\_\_  
Testigo \_\_\_\_\_  
Dirección \_\_\_\_\_  
Testigo \_\_\_\_\_  
Dirección \_\_\_\_\_

3a) – Original form

**CONSENT FORM FOR PARTICIPATION IN RESEARCH STUDY [2]**

Place: \_\_\_\_\_ Date: \_\_\_\_\_

**TO WHOM IT MAY CONCERN**

I, \_\_\_\_\_ freely and voluntarily declare that I accept to participate in the study titled **“Olfactory perception as a criterion for evaluating the effectiveness of the restoration of crude oil-contaminated soils”** que to be conducted in the Institution, and whose objectives consist of assessing the effectiveness of olfactory perception tests as a criterion for the evaluation of projects aimed at the restoration of soils contaminated with medium and heavy crude oil.

I understand the procedures, tests and treatments used to achieve the above mentioned objectives, and that this consists in conducting a controlled odor test on those samples that are presented and also the risks to my person has a low probability.

I understand that from the present study the following benefits may be derived:

- Contribution to the generation of knowledge through a scientific publication that our institution will carry-out.
- Demostration thar olfactory perception is a criterion that may be employed in the resotration of crude oil-contaminated soils.

It is my understanding that I will be free to remove myself from the present research at any moment that I may desire to do so. Also, that I may solicit additional information about the risks and benefits of my participation in the study. In case I decide to remove myself, the treatment that I receive as a worker (or student) in the institution will not be affected.

Name \_\_\_\_\_ Signature \_\_\_\_\_  
Address \_\_\_\_\_  
Date \_\_\_\_\_  
Witness \_\_\_\_\_  
Address \_\_\_\_\_  
Witness \_\_\_\_\_  
Address \_\_\_\_\_

3b) - Translated form

**Figure S3.** Acceptance form for participation in an investigation.

PROYECTO

“Percepción olfativa como criterio para evaluar la efectividad de la restauración de suelos contaminados con petróleo crudo”

HOJA DE DATOS DE PANELISTAS

Fecha \_\_\_\_\_

Nombre:		Edad:	
Sexo: M <input type="checkbox"/>	F <input type="checkbox"/>	Ocupación:	
Domicilio:			
Lugar de Origen:	Zona Urbana <input type="checkbox"/>	Zona Rural <input type="checkbox"/>	
¿Conoces el objetivo de la investigación?	Si <input type="checkbox"/>	NO <input type="checkbox"/>	
¿Estás convencido de querer participar?	Si <input type="checkbox"/>	NO <input type="checkbox"/>	
¿Eres fumador?	Si <input type="checkbox"/>	NO <input type="checkbox"/>	
¿Consumes café con regularidad?	Si <input type="checkbox"/>	NO <input type="checkbox"/>	
¿Eres alérgico a alguna sustancia?	Si <input type="checkbox"/>	NO <input type="checkbox"/>	
¿Cómo consideras tu estado de salud?	Bueno <input type="checkbox"/>	Malo <input type="checkbox"/>	
¿Has visto algún derrame de petróleo?	Si <input type="checkbox"/>	NO <input type="checkbox"/>	
¿Has trabajado en la industria petrolera?	Si <input type="checkbox"/>	NO <input type="checkbox"/>	

4a) - Original form



**PROJECT**

**“Olfactory perception as a criterion for evaluating the effectiveness of the restoration of crude oil-contaminated soils”**

**PANELIST DATA SHEET**

Date: \_\_\_\_\_

Number:		Age:	
Sex: M	<input type="checkbox"/>	Occupation:	
Address:			
Birthplace:	Urban Zone	<input type="checkbox"/>	Rural Zone <input type="checkbox"/>
Do you know the purpose of the investigation?	Yes	<input type="checkbox"/>	NO <input type="checkbox"/>
Are you convinced of wanting to participate?	Yes	<input type="checkbox"/>	NO <input type="checkbox"/>
Are you a smoker?	Yes	<input type="checkbox"/>	NO <input type="checkbox"/>
Do you consume coffee regularly?	Yes	<input type="checkbox"/>	NO <input type="checkbox"/>
Are you allergic to any substance?	Yes	<input type="checkbox"/>	NO <input type="checkbox"/>
How do you consider your state of health?	Good	<input type="checkbox"/>	Bad <input type="checkbox"/>
Have you seen any oil spills?	Yes	<input type="checkbox"/>	NO <input type="checkbox"/>
Have you worked in the oil industry?	Yes	<input type="checkbox"/>	NO <input type="checkbox"/>

4b) Translated data sheet

**Figure S4.** Panelist data sheet

**Table S1.** Characterization of uncontaminated soils [3]

Variable	Fluvisol	Arenosol	Gleysol
Coordinates	18° 06' 04''N, 93° 52' 59''W	18° 12' 47''N, 94° 00' 42''W	18° 06' 28''N, 93° 52' 57''W
Real Density (g cm <sup>-3</sup> )	2.4	2.5	2.2
Apparent Density (g cm <sup>-3</sup> )	1.1	1.4	1.1
pH	7.0	6.7	7.1
Porosity (%)	54	45.6	49.5
Field Capacity (%)	37	19.5	37
Electric Conductivity (dS m <sup>-1</sup> )	0.01	0.31	0.01
Organic material (%)	2.3	1.46	4.9
Texture	Clayey	Sandy	Clayey
Sand (%)	6.8	87.2	25.8
Silt (%)	34.3	3.7	21.3
Clay (%)	58.8	9.0	52.8
Cation Exchange Capacity (cmol(+) kg <sup>-1</sup> )	21.4	3.1	35.7
N (cmol kg <sup>-1</sup> )	0.8	0.056	0.2
P Olsen (mg kg <sup>-1</sup> )	23.38	2.75	11.69
Ca <sup>++</sup> (cmol kg <sup>-1</sup> )	19	1.39	25.53
Mg <sup>++</sup> (cmol kg <sup>-1</sup> )	1.3	0.36	2.06
Na <sup>+</sup> (cmol kg <sup>-1</sup> )	0.2	0.12	1.34
K <sup>+</sup> (cmol kg <sup>-1</sup> )	0.2	0.05	0.53
WDPT (s)	<5	<5	<5
MED (M)	0	0	0

**Table S2.** Initial fertility parameters in contaminated soils

SOIL TYPE	Field Capacity (%)			Repellency (MED-10) (molar)			Repellency (WDPT) (s)		
	Soil Clean	Contaminated Soil		Soil Clean	Contaminated Soil		Soil Clean	Contaminated Soil	
		W/O F	WF		W/O F	WF		W/O F	WF
FLMC	37	35.13	34.62	0	5.28	5.59	<5	>3,600	>3,600
FLHC	37	26.64	26.27	0	6.22	6.23	<5	>3,600	>3,600
GLMC	19.5	18.21	18.21	0	11	10.58	<5	>3,600	>3,600
GLHC	19.5	23.09	23.09	0	6.33	6.22	<5	>3,600	>3,600
ARMC	37	37.21	35.73	0	3.78	3.24	<5	137.78	245.49
ARHC	37	27.9	30.14	0	5.24	5.37	<5	1,944.81	>3,600

FL=Fluvisol; GL=Gleysol; AR=Arenosol; MC= Medium Crude Oil; HC=Heavy Crude Oil; W/O F=Without Fertilizer; WF=With Fertilizer

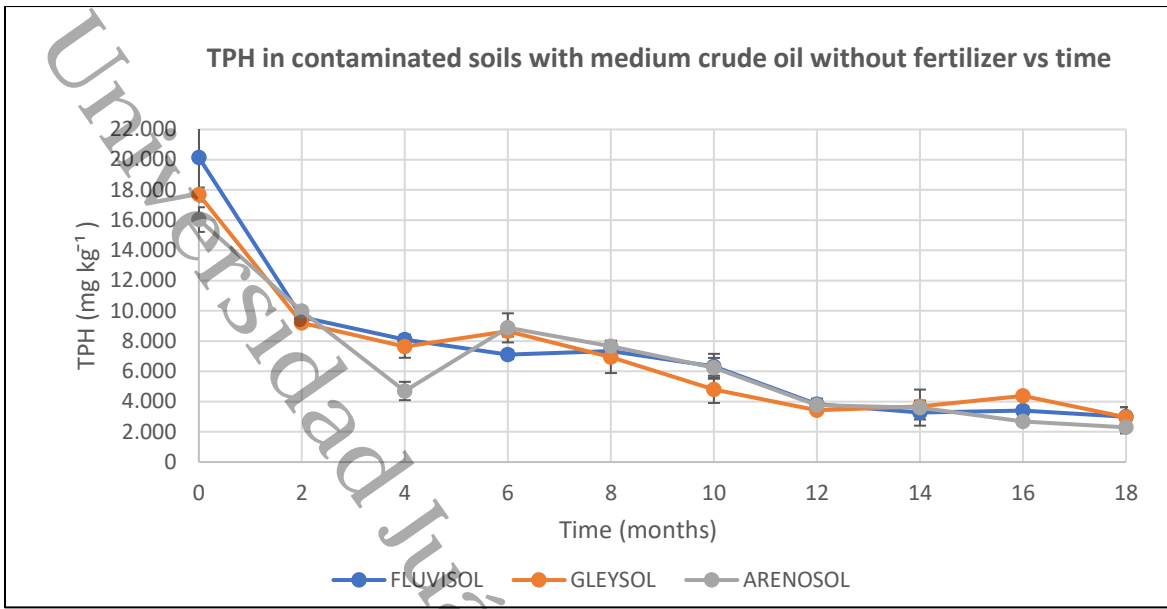


Figure S5. TPH degradation in contaminated soils with medium crude oil without fertilizer.

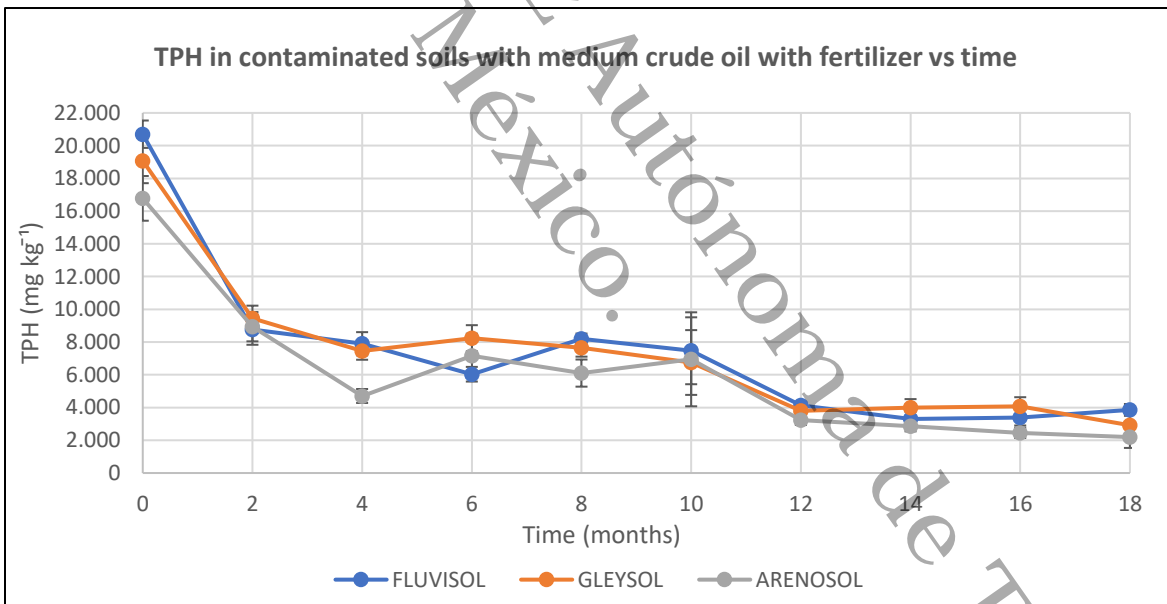
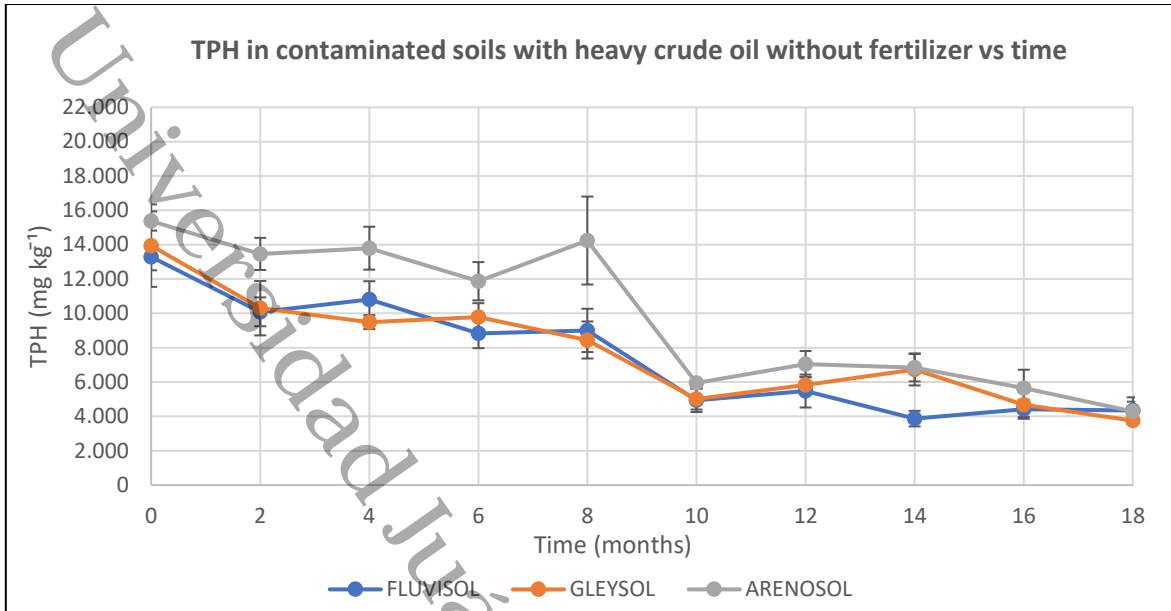
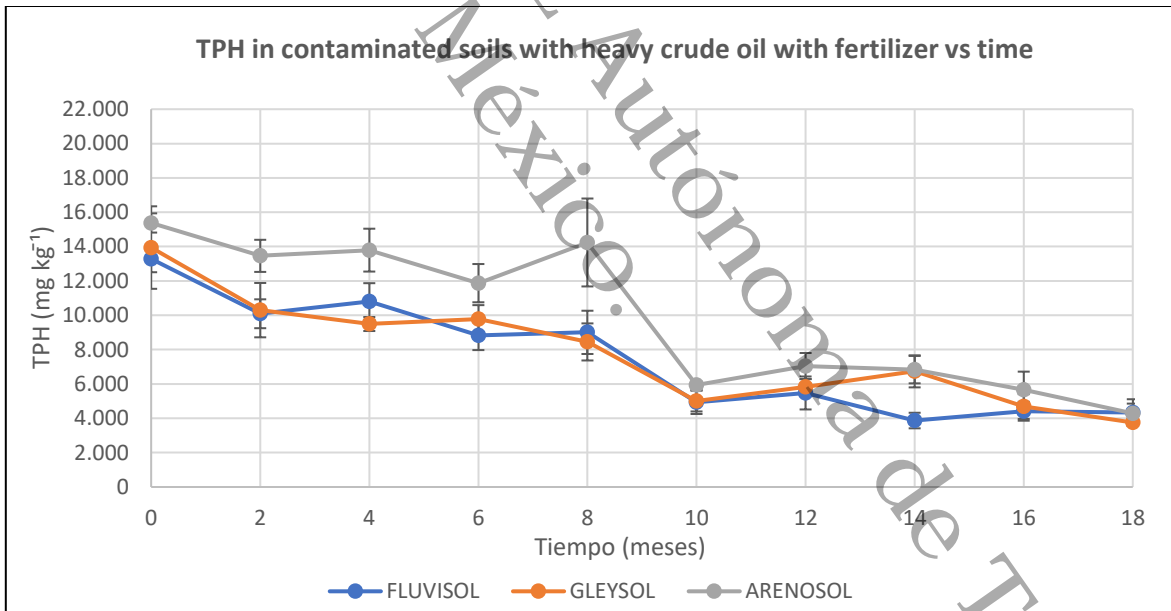


Figure S6. TPH degradation in contaminated soils with medium crude oil with fertilizer.



**Figure S7.** TPH degradation in contaminated soils with heavy crude oil without fertilizer.



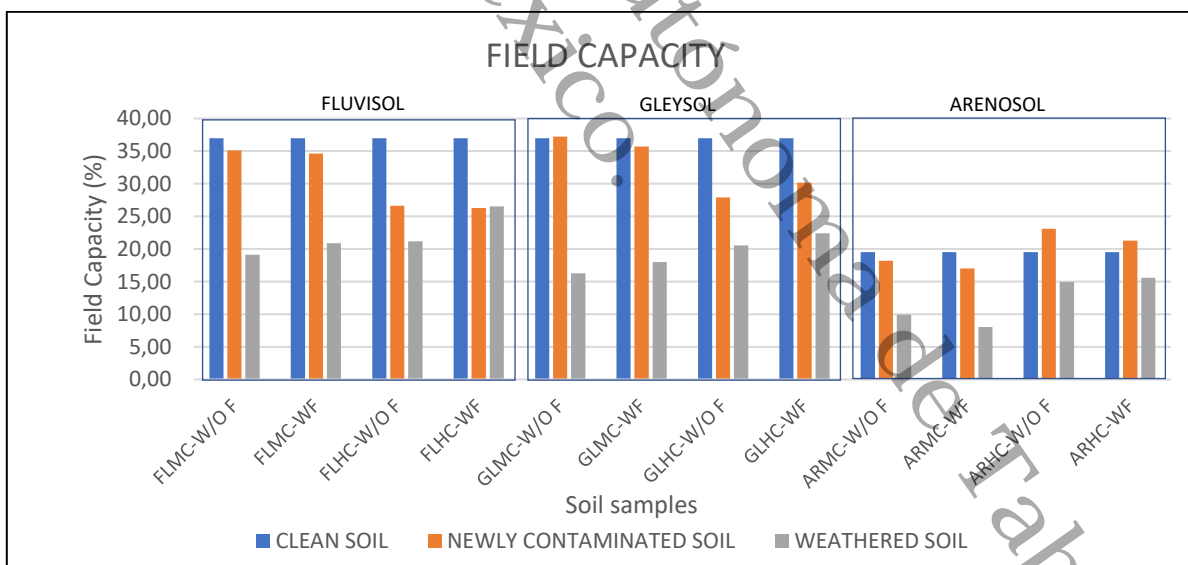
**Figure S8.** TPH degradation in contaminated soils with heavy crude oil with fertilizer

**Table S3.** Classification of the severity of water repellency evaluated by the MED method and expressed as molarity, proposed by King (1981). Source: Jaramillo [4]

Severity class	MED (M) value range
Not repellent	0
Low repellency	0.2 - 1.0
Moderate repellency	1.2 - 2.2
Severe repellency	2.4 - 3.0
Very severe repellency	>3.2

**Table S4.** Classification of the WDTP proposed by Dekker & Jungerius [5]

Persistence class	Persistence level of water repellency	WDTP (s) values
0	Not repellent	<5
1	Light	5 - 60
2	Strong	60 - 600
3	Severe	600 - 3600
4	Extreme	>3600



**Figure S9.** Field capacity in contaminated soils with medium and heavy crude oil

FL=Fluvisol; GL=Gleysol; AR=Arenosol; MC= Medium Crude Oil; HC=Heavy Crude Oil; W/O F=Without Fertilizer; WF=With Fertilizer

**Table S5.** Repellency (MED y WDTP) [6] in contaminated soils treated by bioremediation and natural attenuation for 18 months

Sample	REPELLENCY (MED-10) (molarity)		REPELLENCY WDTP (s)	
	MED Treated soil	Severity Classification	WDTP Treated soil	Persistence Classification
FLMC-W/O F	2.11	Moderate	209.50	Strong
FLMC-WF	2.81	Severe	>3,600	Extreme
FLHC-W/O F	3.46	Very severe	609.59	Severe
FLHC-WF	3.76	Very severe	>3600	Extreme
GLMC-W/O F	0.00	Not Repellent	12,83	Light
GLMC-WF	0.00	Not Repellent	25.33	Light
GLHC-W/O F	0.62	Low	89.04	Strong
GLHC-WF	2.00	Moderate	246.76	Strong
ARMC-W/O F	5.34	Very Severe	>3,600	Extreme
ARMC-WF	5.12	Very Severe	>3,600	Extreme
ARHC-W/O F	5.46	Very Severe	>3,600	Extreme
ARHC-WF	5.34	Very Severe	>3,600	Extreme

FL=Fluvisol; GL=Gleysol; AR=Arenosol; MC= Medium Crude Oil; HC=Heavy Crude Oil; W/O F=Without Fertilizer; WF=With Fertilizer

**Table S6.** Weight loss of organisms in acute toxicity tests by direct contact

SAMPLE	October 2018		December-2018	
	Weight loss		Weight loss	
	Sample	Witness	Sample	Witness
FLMC-W/O F	14.59%	5.81%	15.88%	15.86%
FLMC-WF	12.17%	5.81%	13.05%	15.86%
FLHC-W/O F	17.28%	17.49%	20.35%	17.42%
FLHC-WF	10.63%	17.49%	18.91%	17.42%
GLMC-W/O F	11.66%	5.81%	14.86%	12.10%
GLMC-WF	8.15%	5.81%	8.91%	12.10%
GLHC-W/O F	12.27%	17.49%	19.70%	18.69%
GLHC-WF	12.44%	17.49%	19.33%	18.69%
ARMC-W/O F	21.30%	-2.67%	24.80%	12.02%
ARMC-WF	17.80%	-2.67%	18.15%	12.02%
ARHC-W/O F	27.31%	-2.67%	18.78%	6.85%
ARHC-WF	20.36%	-2.67%	16.32%	6.85%

FL=Fluvisol; GL=Gleysol; AR=Arenosol; MC= Medium Crude Oil; HC=Heavy Crude Oil; W/O F=Without Fertilizer; WF=With Fertilizer

### References for Supplementary Material:

1. National Institute for Occupational Safety and Health. *NIOSH Pocket Guide to Chemical Hazards: Kerosen*. 2018; Available from: <https://www.cdc.gov/niosh/npg/npgd0366.html>.
2. Méndez-Ramírez, I., Namihira-Guerrero, D., Moreno-Altamirano, L., and Sosa de Martínez, C., *El protocolo de Investigación: Lineamientos para su elaboración y análisis (The Research Protocol: Guidelines for its elaboration and analysis)*. 2a ed. 2011, México: Trillas. 210 p.
3. Ávila Acosta, C.R., *Efectos de la intemperización en las propiedades fisicoquímicas del suelo contaminado con petróleo crudo. (Tesis de Maestría). [Effects of weathering on the physiochemical properties of crude oil-contaminated soil. (Master's Thesis)*. 2014, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, División Académica de Ciencias Biológicas: Villahermosa, Tabasco, México.
4. Jaramillo, J., Repelencia al agua en suelos: una síntesis (Water repellency in soils: a synthesis). *Rev. Acad. Colomb. Cienc*, 2006. **30**(115): p. 215-232.
5. Dekker, L.W. and Jungerius, P.D., Water repellency in the dunes with special reference to the Netherlands. *Catena, Supplement*, 1990(18): p. 173-183.
6. Adams, R.H., Guzmán-Osorio, F.J., and Zavala-Cruz, J., Water repellency in oil contaminated sandy and clayey soils. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2008a. **5**(4): p. 445-454.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.

**CAPITULO III Percepción de olor en suelos contaminados con petróleo en comunidades rurales de acuerdo a su historia de exposición previa.**

**Odor perception of petroleum-contaminated soil in rural communities according to exposure history.**



### **CAPITULO III Percepción de olor en suelos contaminados con petróleo en comunidades rurales de acuerdo a su historia de exposición previa.**

#### **Odor perception of petroleum-contaminated soil in rural communities according to exposure history.**

En el capítulo anterior, se reportó los resultados de la degradación de los hidrocarburos de petróleo mediante la biorremediación y atenuación natural en tres tipos de suelos. Así también la evaluación de la fertilidad y toxicidad en las muestras de suelo. Este estudio se comparó con una prueba de percepción de olor previa efectuada en una comunidad urbana, determinando que el olor es confiable para evaluar la toxicidad de los suelos estudiados y posiblemente confiable para evaluar la fertilidad del Gleysol; pero, por sí solo, como criterio *de facto* no es confiable para evaluar la fertilidad de los suelos Fluvisol y Arenosol, por lo que debería evitarse. Para comprobar la confiabilidad de los resultados de la prueba de percepción de olor en la comunidad urbana, se llevó a cabo la misma prueba controlada en dos comunidades rurales con y sin experiencia en derrames de petróleo, ambas comunidades del municipio de Cunduacán, Tabasco. De igual manera que con la comunidad anterior, se integró los paneles con 15 individuos cada uno, sin entrenamiento. Se repitió todo el procedimiento de la prueba informando a los panelistas sobre los objetivos de su participación y la libertad de abandonar la prueba si así lo consideraban prudente.

De los resultados obtenidos se pudo observar de la influencia del entorno de los individuos para calificar los niveles de intensidad y aceptación del olor de suelos. Así por ejemplo la comunidad de Los Cerros, sin exposición a las actividades petroleras, tuvieron una percepción muy similar a la comunidad urbana para los suelos Fluvisol y Arenosol. Sin embargo, la intensidad y aceptación del suelo Gleysol fue calificado con niveles más altos por la comunidad Los Cerros. Por otra parte, la comunidad Francisco J. Mújica, influenciados por convivir con los olores propios de sus predios inundables y los generados por las instalaciones petroleras próximas a la comunidad, percibieron los olores a un nivel mucho más bajo en intensidad y con mayor grado de aceptación los olores de los tres suelos tratados. Para el caso del Arenosol, aunque aprobatorio, fue calificado con menor grado de aceptación por los tres grupos de panelistas.

Concluido el estudio, se confirma que, como criterio *de facto*, el olor del suelo es confiable para evaluar la toxicidad aguda de los tres suelos estudiados y con cierta reserva, la fertilidad en el Gleysol. Así también, se corrobora que este criterio no sería confiable para evaluar la fertilidad de los suelos Fluvisol y Arenosol, por lo consiguiente, debería evitarse.

**Percepción de olor en suelos contaminados con petróleo en comunidades rurales de acuerdo a su historia de exposición previa.**

**Odor perception of petroleum-contaminated soil in rural communities according to exposure history.**

S. López-Aguilar<sup>1</sup>, R. H. Adams<sup>2\*</sup>, V.I. Domínguez-Rodríguez<sup>2</sup>,  
J.A. Gaspar-Génico<sup>2</sup>, J. Zavala-Cruz<sup>3</sup> y E. Hernández-Nataren<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Ingeniería, Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, Subsede Reforma, Carretera Reforma-Juárez Km. 6.5. Ra. Sta. Cruz, Reforma, Chiapas 29500, México.

<sup>2</sup>División Académica de Ciencias Biológicas, Laboratorio de Remediación, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Carretera Villahermosa-Cárdenas km. 0.5 s/n, Villahermosa, Tabasco 86150, México.

<sup>3</sup>Colegio de Postgraduados, Campus Tabasco. Periférico Carlos A. Molina s/n, H. Cárdenas, Tabasco 86500, México.

\* Correspondan author. E-mail: drrandocan@hotmail.com

Tel. 993-330-12-44, Fax 993-354-43-08

Sent date: 06/08/2020

**Abstract:**

The perception of petroleum in soil (Fluvisol, Gleysol and Arenosol) was evaluated in two rural communities with and without previous experience to spills, to find similarities and differences between them and with respect to an urban population (previous study), and to test the reliability of using odor as a *de facto* criterion for reception of remediation projects. In the communities, odor was perceived as less intense and more acceptable than in the urban population. Likewise, the community with previous experience perceived the odor as less intense and more acceptable than the community without previous experience. The odor in Gleysol was adequate to avoid toxicity and fertility problems. However, in the community located in less floodable soils, the odors were perceived to be more intense and less acceptable in this soil, which comes from floodable areas and exhibits odor of anoxic conditions. In the Fluvisol, the odor was reliable only to avoid problems with toxicity. In the Arenosol, the odor was reliable only to avoid problems of toxicity, and this only after six months of bio-treatment. For these reasons, it is not recommended to use odor as a *de facto* criterion for the reception of remediation projects in Fluvisols and Arenosols.

**Keywords:** Perception, odor, bioremediation, attenuation, crude petroleum.

## **Resumen:**

Se evaluó la percepción de petróleo en suelo Fluvisol, Gleysol y Arenosol en dos comunidades rurales con y sin experiencia previa a derrames de petróleo. Esto, para encontrar similitudes y diferencias entre ellas y con una población urbana (estudio previo), y para probar la confiabilidad de utilizar el olor a petróleo como un criterio de facto para la aceptación de obras de remediación. Las comunidades percibieron los olores menos intensos y más aceptables que la población urbana. Igualmente, la comunidad con experiencia previa percibió los olores menos intensos y más aceptables que la comunidad rural sin experiencia. La percepción de olor a petróleo en Gleysol fue adecuado para evitar problemas de toxicidad y fertilidad, pero la comunidad rural ubicada en suelos menos inundables percibió los olores más intensos y menos aceptables en este suelo, de áreas inundables y que presenta olores de condiciones anoxias. Para el Fluvisol, el olor solo era confiable para evitar problemas de toxicidad. Para el Arenosol, solo era confiable para evitar problemas de toxicidad, y esto, solo después de seis meses de bio-tratamiento. Por estas razones, no se recomienda como un criterio de facto para la recepción de obras de remediación en suelos Fluvisol y Arenosol.

*Palabras clave:* Percepción, olor, biorremediación, atenuación, petróleo crudo.

---

## **1. Introducción**

En los países en donde se desarrollan actividades petroleras es común encontrar extensas áreas de suelos contaminados por derrames de hidrocarburos, siendo las tareas de exploración, refinación, distribución, almacenamiento de petróleo crudo y sus derivados, falta de mantenimiento y robo de combustible, las causas más comunes, de manera que se alteran sus características fisicoquímicas y biológicas, con repercusiones en el ámbito ambiental, económico y social (Cavazos-Arroyo et al., 2014). Otras causas incluyen desastres naturales o actos deliberados. Los hidrocarburos del petróleo presentes en el suelo pueden afectar los factores ligados a la fertilidad a través de varias formas: toxicidad directa a los organismos en el suelo, reducción en la retención de humedad y/o nutrientes, compactación, así como variaciones en el pH y salinidad (Adams et al., 2008b).

Para proteger el recurso del suelo, muchos países han establecido una serie de leyes, reglamentos y normas. Sin embargo, en muchos lugares la población local puede no sentir que las

regulaciones ambientales son lo suficientemente estrictas, que se hacen cumplir lo suficiente o que realmente regulan lo que se debe evaluar para proteger la salud pública y el medio ambiente (COA, 2017; LGAC, 2003; LGEEPA, 2018). En México, existe una gran sospecha entre los propietarios en cuanto a la veracidad y validez de las determinaciones de laboratorio. A menudo, se considera probable que la parte contaminante haya sobornado a las autoridades gubernamentales o laboratorios comerciales responsables de la recolección y procesamiento de muestras, para informar los resultados a favor de la parte contaminante. Esto ha llevado a la práctica general de usar el olor del suelo como el indicador de facto para los propietarios de propiedades rurales para evaluar el grado de contaminación del suelo por derrames de hidrocarburos, así como el éxito (o no) de los proyectos de remediación. Solo si el suelo pasa esta prueba de olor por parte del propietario, se acepta el proyecto de remediación. En general, no solo los propietarios, sino también el personal de las compañías petroleras, las compañías de remediación y las autoridades gubernamentales también usan el olor del suelo como primer indicador de contaminación/remediación del suelo (Discovery Channel, 2007; Trujillo-Narcia et al., 2012).

A pesar de su carácter subjetivo, el olor es también relativo en términos contextuales, ya que debido a diferentes factores del entorno, no es necesariamente percibido y aceptado de igual manera por los individuos de diferentes comunidades (Synnott, 2003). Esta diferencia en la percepción puede deberse a la exposición al petróleo en comunidades en donde existen actividades de la industria petrolera (producción, transporte, derrames, etc.) en comparación con comunidades que pocas veces experimentan los olores de petróleo crudo. En este caso, es importante comparar y evaluar, sobre todo, la percepción en la comunidad más probable a sufrir un derrame en sus parcelas.

Partiendo de la hipótesis de que la percepción de olor a hidrocarburos en suelos remediados puede ser empleada como un criterio confiable para asegurar una toxicidad en el mismo rango que el nivel umbral y para preservar la fertilidad del suelo, se realizaron una serie de experimentos recientemente en donde se cuantificó la percepción de olor de hidrocarburos en suelo contaminado con petróleo crudo y sujeto a biorremediación o atenuación natural (López-Aguilar et al., 2020). En aquella investigación, se midió parámetros de intensidad de olor y aceptabilidad de olor en tres tipos de suelo (Fluvisol, Gleysol y Arenosol) por varones entre 20 y 50 años en una comunidad universitaria, consistiendo de alumnos y personal de mantenimiento. Esta percepción fue comparada con parámetros comúnmente afectados por petróleo: toxicidad aguda (bioensayos con

lombriz de tierra) y fertilidad del suelo (repelencia al agua, capacidad de campo). Se observó una muy buena correlación entre la toxicidad y el olor, siendo esto adecuado para asegurar que el suelo remediado no tuviera toxicidad. Sin embargo, generalmente, no hubo una correlación entre la percepción de olor y los parámetros de fertilidad, no siendo confiable para proteger la productividad vegetal de un predio contaminado/remediado.

El estudio anterior se realizó con panelistas de una población urbana, sin embargo, los derrames de petróleo crudo ocurren típicamente en ambientes rurales, lo que hizo importante en el actual estudio evaluar la percepción de olor en poblaciones rurales considerando su estilo de vida, alimentación, costumbres de campo y exposición a una variedad de olores de suelo, plantas, maquinarias, etc. Se planteó como objetivo del presente estudio evaluar en dos comunidades rurales la percepción olfativa como criterio para discriminar la efectividad de la restauración de suelos contaminados con petróleo crudo mediano y pesado. Se consideró un factor que podría ser importante en la percepción, las experiencias previas con derrames de hidrocarburos en dos comunidades rurales – una sin antecedentes de contaminación por petróleo, y la otra en donde se había experimentado varios derrames en las últimas décadas. Los resultados obtenidos se utilizaron para compararse entre las dos comunidades rurales y con el estudio anterior que se realizó en una comunidad urbana, la universitaria (López-Aguilar et al., 2020).

## **2. Materiales y Métodos**

Para el presente trabajo se usaron los suelos colectados, contaminados y tratados correspondiente al estudio en una población urbana. Los detalles de aquel trabajo, incluyendo las propiedades de los suelos usados (Fluvisol, Gleysol y Arenosol), las técnicas de bio-tratamiento, y los resultados de toxicidad, fertilidad y percepción de olor en la población universitaria (urbana), se ha reportado previamente (López-Aguilar et al. 2020). En aquel estudio se midió la toxicidad por un bioensayo con lombrices, y parámetros de fertilidad incluyendo la concentración de hidrocarburos totales, repelencia al agua, humedad crítica y capacidad de campo.

### **2.1 Selección de comunidades rurales para pruebas de percepción de olores**

Se seleccionaron dos pequeñas comunidades rurales en la cuenca del río Samaria, ambas en depósitos aluviales del mismo río. Ambas comunidades están ubicadas junto a diques artificiales a aproximadamente dos kilómetros al norte o al sur del río (que corre de este a oeste) y a unos 3.5-4 km al este de la carretera principal en el área. La comunidad de control, Los Cerros es una

comunidad en depósitos aluviales relativamente altos (Fluvisoles) que se encuentran a unos dos o cuatro metros sobre el área circundante (Jiménez-Ramírez, 2013). Las actividades comunitarias son la cría de ganado y la agricultura, que incluye plátanos, cacao, algunos cítricos y cultivos de subsistencia (maíz, frijoles, calabaza, chile, etc.). La mayoría de los suelos circundantes son Fluvisoles con algunos Gleysoles en áreas bajas. Esta comunidad está ubicada en 15Q 488994.39 m E; 1994122.52 m N, coordenadas UTM, tiene 252 habitantes y 77 viviendas. Ocupa el puesto 98 en el municipio de Cunduacán en términos de tamaño de la población (Pueblos de México en Internet, 2020a). Para este estudio, sirve como control: no hay actividad relacionada con el petróleo en esta área. La segunda comunidad, Francisco J. Mújica, se encuentra en un área justo al lado del dique sur. Muchas casas están justo al lado del dique (para reducir los materiales de relleno y riesgos a inundación). Algunas casas construidas un poco lejos del dique (~ 20 m), están a unos dos metros sobre el área circundante. Las principales actividades en esta comunidad son la cría de ganado con cultivos de subsistencia limitada, principalmente maíz y calabaza. La mayoría de los suelos circundantes son Gleysoles con algunos atípicos de Fluvisol. Esta comunidad está ubicada en 15Q 488517.63 m E; 1990059.55 m N coordenadas UTM, y tiene 219 habitantes y 62 viviendas. Ocupa el puesto 101 en el municipio de Cunduacán en términos de tamaño de la población (Pueblos de México en Internet, 2020b).

Esta comunidad tiene varias tuberías que la atraviesan. En 2009, una gran ruptura de la tubería resultó en la contaminación de aproximadamente ocho hectáreas de pastizales bajos y una pequeña cantidad de tierras de cultivo (< 1 Ha) con petróleo crudo ligero (37 ° API) (Aguilar-Aguilar, 2014; López-Padrón, 2018). Este derrame fue biorremediado. Además, en o junto a la comunidad hay varios pozos petroleros y a unos dos kilómetros al este hay un área importante de recolección y distribución de petróleo crudo ("Nudo Samaria"), en el campo petrolífero de Samaria. Además del gran derrame en la comunidad ya mencionado, unos años más tarde hubo otro derrame (~ 7 ha) a unos 3.5 km al oeste. En esta comunidad, el tamaño de la muestra no era lo suficientemente grande como para ser comparable al control, y se complementó con una prueba de olor adicional al invitar a seis participantes de la comunidad más cercana con las mismas condiciones de exposición previa al petróleo, a unos 2.8 km al este (Pueblos de México en Internet, 2020c), en Cumuapa 2da Sección (15Q 490910.68 m E; 1988412.94 m N, coordenadas UTM). Todas estas comunidades rurales se encuentran en el municipio de Cunduacán del estado de Tabasco, México. El clima local es el monzón tropical (Am en el sistema de clasificación de Köppen), con una temperatura media anual de ~ 27 ° C

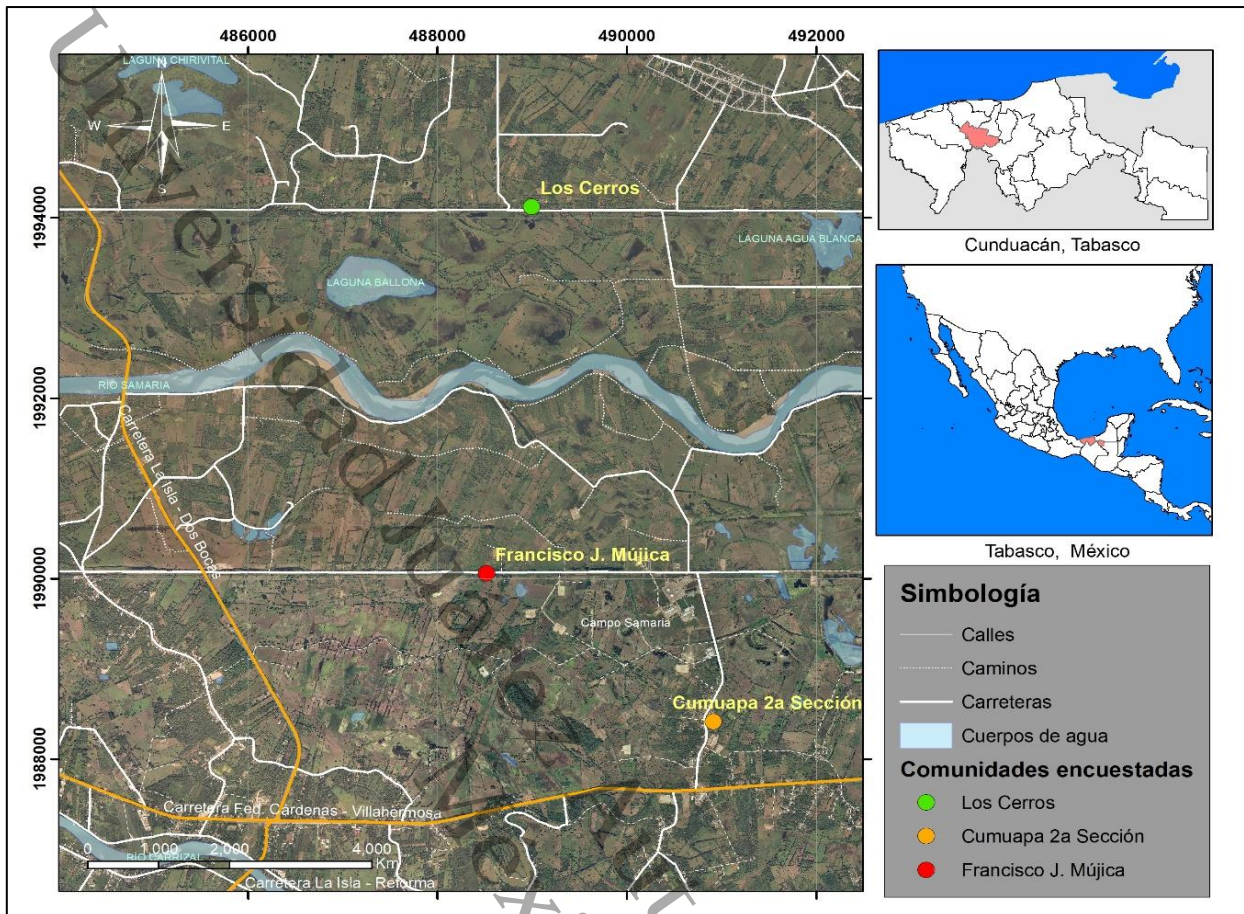
y una precipitación media anual de ~ 2000 mm (Adams et al., 2002). Las condiciones cálidas y húmedas prevalecen durante casi todo el año.

## **2.2 Prueba de percepción de olor**

Para efectos de llevar a cabo las pruebas de percepción de olor se consideró seleccionar dos comunidades rurales, tomando en cuenta sus antecedentes con derrames de petróleo y actividades petroleras en general, así como la disponibilidad y deseos de participar por parte de los habitantes. Se solicitó el apoyo a las autoridades locales y mediante los representantes de las dos comunidades rurales que participaron, se invitó a los habitantes varones de entre 20 y 50 años a participar en la prueba de percepción de olor. Se les informó sobre los objetivos, los riesgos y el procedimiento de la prueba, haciendo hincapié en que tenían toda la libertad de abandonarla si así lo deseaban. Para ello, firmaron un formato de aceptación de participación y respondieron a otro formato de datos personales. Estos formatos han sido presentados anteriormente en López-Aguilar et al. (2020).

Se utilizaron instalaciones temporales en espacios ventilados facilitados por las comunidades participantes empleando cabinas portátiles de madera armadas en el lugar, siguiendo las recomendaciones establecidas en la norma ISO 8589: 2010/A1:2014 (ISO, 2014; Sanz Castrodeza, 2018). En cada comunidad participaron 15 panelistas. En el caso de la comunidad Francisco J. Mujica, no se completaron los panelistas por lo que fue necesario invitar a seis habitantes de la comunidad más próxima (a 2.8 Km) que comparten las mismas experiencias de derrames de petróleo y actividades petroleras (Fig. 1) (INEGI, 2017, 2018a, 2018b, 2020).

Las muestras contenían tres tipos de suelo contaminados con dos tipos de petróleo crudo (tratado por biodegradación), las cuales previamente fueron preparadas en frascos de vidrio con tapa de rosca uniformes forrados con papel de estraza e identificados mediante un código que los panelistas desconocían, de acuerdo a criterios de la norma ISO 5496: 2006 (ISO, 2006). Se homogenizó la humedad de las muestras a un 70% de su capacidad de campo, y las condiciones de la sala de prueba fue de ~ 27 °C y ~ 50 % de humedad relativa. Cada panelista efectuó de manera aleatoria el olfateo de las muestras destapando con cuidado el frasco (uno a la vez) y lo acercó a unos cinco centímetros de su nariz e inhaló de manera suave en un tiempo promedio de cinco a diez segundos para evaluar la intensidad y grado de aceptación del olor de las muestras. A cada panelista se le asignaron un total de 39 frascos (tres de ellos eran testigos).



Nota: la mayoría de los espacios de color gris claro cerca a F.J. Mújica y Cumuapa 2da Secc. son plataformas de perforación, baterías de separación, sección de válvulas u otras estructuras relacionadas a la industria petrolera del “Nudo Samaria” del campo petrolero del mismo nombre.

Desarrollado de:

1. Conjunto de datos vectoriales de información topográfica escala 1:50 000 serie III. Carta topográfica E15A89. Cunduacán. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 2018.
2. Conjunto de datos vectoriales de información topográfica escala 1:50 000 serie III. Carta topográfica E15C19. Reforma. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 2018.
3. Marco Geoestadístico 2017. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
4. Ortofotos digitales E15A89E, E15A89F, E15C19B y E15C19C. Escala 1:20 000 Servicio WMS. Servidor URL: <http://gaia.inegi.org.mx/NLB/mdm5.wms>. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 2020.

**Figura 1.** Ubicación de las comunidades participantes en la prueba de olor.

Con la finalidad de limpiar el paladar de los panelistas en las pausas que consideraron conveniente realizar (generalmente, después de evaluar de nueve a diez muestras), se les proporcionó agua para beber o enjuagar a temperatura ambiente y rodajas de manzana. Dado que las muestras analizadas no exhibieron olores intensos o agresivos, el tiempo de ejecución de la prueba fue relativamente breve sin que haya sido necesario limitar el número de muestras en cada sesión (Lotufo et al., 2015; Watts et al., 1992). Las respuestas se registraron en un formato de encuesta en donde se empleó un método semicuantitativo conteniendo tres preguntas con respuestas dicotómicas de “Sí” o “No”, y dos preguntas politómicas para evaluar la intensidad y nivel



de aceptación del olor con una escala de siete puntos categorizados desde “Sin olor” hasta “Olor muy fuerte” y “Muy agradable” hasta “Muy desagradable”, respectivamente. Los resultados fueron analizados con estadística descriptiva mediante porcentajes, promedios y desviación estándar. Para los datos obtenidos en la prueba de intensidad y grado de aceptación del olor (variables ordinales) se realizó un Análisis de Varianzas (ANOVA) y Prueba de Múltiples Rangos (PMR) con un nivel de significancia de  $\alpha = 0.05$  utilizando el paquete estadístico IBM SPSS Statistics 20 para Windows y Statgraphics (Lotufo et al., 2015; Watts et al., 1992).

### **2.3 Ética**

El protocolo de investigación fue evaluado y aprobado por el Comité de Investigación Divisional de la División Académica de Ciencias Biológicas de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (Folio No. 395-2017) después de considerar la protección de la salud humana, la dignidad y el rigor científico. Para más detalles se puede consultar el texto completo en López-Aguilar et al. (2020).

## **3. Resultados**

### **3.1 Características de la muestras iniciales y tratadas**

La caracterización inicial de los suelos estudiados, datos de reducción en la concentración de hidrocarburos, toxicidad aguda y parámetros de fertilidad han sido publicados previamente (López-Aguilar et al. 2020). La concentración de hidrocarburos al inicio del proceso de biorremediación fue de  $20000 \text{ mg kg}^{-1}$ , reduciéndose al final del tratamiento en aproximadamente en un 80 %, dentro del rango de  $2200$  a  $4300 \text{ mg kg}^{-1}$ , cifras muy cercanas a los Límites Máximos Permisibles (MPL) en la norma mexicana ( $3,000 \text{ mg kg}^{-1}$ ) (SEMARNAT, 2013). Sin embargo, los niveles bajos de TPH alcanzados no fueron suficientes para mantener la humedad (capacidad de campo) de los suelos en comparación con los niveles de los suelos no contaminados, en donde se obtuvieron valores de aproximadamente 50-70 % en el Fluvisol (suelo de vega de río), alrededor de 45-60 % en el Gleysol (arcilloso, suelo inundable), y de aproximadamente 40-75 % en el Arenosol (suelo costero arenoso).

### **3.2 Repelencia al agua**

Después de ser contaminados e incluso después de los 18 meses de tratamiento en un ambiente húmedo tropical, muchas de las muestras se manifestaron aún repelentes, en especial, la

repelencia al agua fue alta en el suelo arenoso, medianamente alta en el suelo de vega de río (Fluvisol) contaminado con petróleo crudo tipo pesado y sin nutrientes añadidos; pero era de moderada a nula en los otros suelos de vega del río estudiados, y prácticamente nulo en el suelo arcilloso inundable (Gleysol). Las muestras de Fluvisol y Gleysol que reportaron repelencia se seleccionaron para un análisis de contenido de humedad crítica.

### **3.3 Contenido de Humedad Crítica**

Se determinó el contenido crítico de humedad para que una muestra manifieste una ligera repelencia (para que una gota de agua se absorba en 60 segundos o menos) y para que sea completamente humectable (para que una gota de agua se absorba en cinco segundos o menos). De manera general, las muestras de suelo Fluvisol y Gleysol seleccionados porque reportaron cierta repelencia, mostraron un inicio de repelencia en condiciones de campo, cuando el contenido de humedad disminuía entre 14-17 % H; inclusive si bajarán el contenido de humedad en el rango de aproximadamente 9-14 % H, la repelencia al agua solo sería ligera. Respecto a las muestras de Gleysol estudiadas, estos pudieron ser completamente humectables con un contenido de humedad de aproximadamente 17-18 % H y para ser ligeramente repelente al agua fue de aproximadamente 14-14.5 % H (López-Aguilar et al., 2020). Con base en estos estudios anteriores, es muy improbable que en suelos Fluvisol y Gleysol se presente repelencia al agua, incluso durante la estación de sequía (Adams et al., 2008a; Marín-García et al., 2016).

### **3.4 Capacidad de campo**

De la relación suelo-agua, a pesar de haber disminuido la concentración de TPH después del tratamiento, todas las muestras reportaron una disminución de su capacidad de campo en el rango de 40-75 % de los niveles iniciales (López-Aguilar et al., 2020). Partiendo de que la repelencia al agua fue alta en el suelo arenoso, medianamente alta en el suelo de vega de río si está contaminado con petróleo crudo tipo pesado y sin nutrientes añadidos, pero de moderada a nula en los otros suelos de vega del río estudiados, y prácticamente nulo en el suelo arcilloso inundable, y que todas las muestras registraron disminución de su capacidad de campo, podemos concluir que los mayores niveles de afectación se reflejaron principalmente en el arenoso; moderadamente en el suelo de vega de río (manteniendo aún algunos problemas potenciales), y prácticamente no afectado el suelo arcilloso inundable; atribuyéndole sus características de baja altitud en el paisaje y sus condiciones muy húmedas o inundables con las que se mantiene durante todo el año (Álvarez-Coronel et al., 2020).

### 3.5 Toxicidad

Con respecto a la toxicidad aguda por contacto directo en los bioensayos de lombrices de tierra, estas pruebas se realizaron después del decimocuarto y decimosexto mes, y al final de los tratamientos. En estas pruebas no se observó mortandad; se registraron muy pocos signos de estrés en los organismos y solo una ligera pérdida de biomasa (peso total). Por lo tanto, aunque la concentración de hidrocarburos no se redujo a niveles realmente bajos, la toxicidad aguda debida a los hidrocarburos se eliminó esencialmente. Estos resultados no garantizan que las condiciones sean las adecuadas y favorables para la biota en general en una escala de tiempo más prolongada considerando la reducción de la capacidad de campo y la repelencia al agua.

### 3.6 Prueba de Percepción de Olor

La percepción de olor tiene su origen en millones de sustancias disueltas en el aire, estos pueden ser agradables y desagradables. Durante un derrame de petróleo crudo y al principio de un proceso de remediación de suelos se generan olores fuertes y desagradables. Conforme transcurre el tiempo va desapareciendo y en la etapa final del proceso, como indicador de éxito, el olor es parecido al de tierra común (Velasco & Volke-Sepúlveda, 2003).

La metodología empleada para evaluar el olor en las muestras de suelo estuvo basada en las respuestas de jueces no entrenados constituidos, en un estudio anterior, por estudiantes y trabajadores de mantenimiento de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, con quienes se realizaron nueve pruebas de percepción de olor durante los 18 meses que duró el estudio, considerando a estos participantes como panelistas urbanos (López-Aguilar et al., 2020). Posteriormente se realizó la prueba con habitantes de dos comunidades rurales con las mismas muestras de suelo tratados. En la comunidad de Los Cerros se dedican a la agricultura y la ganadería. Es una comunidad sin experiencias de derrames de petróleo. Por otra parte, la comunidad Francisco J. Mújica es principalmente ganadera, pero algunas personas también trabajan en la industria petrolera. La mayoría de sus predios son inundables y arcillosos de tipo Gleysol. Próximos a esta se encuentran instalaciones petroleras del Activo de Producción Samaria, de Petróleos Mexicanos; cuentan con experiencia en derrames de petróleo en sus territorios.

La prueba fue de carácter controlada en ambas comunidades. Las respuestas de los panelistas fueron registradas en un formulario basado en tres preguntas de respuestas dicotómicas, de "SI" o "NO"; y dos preguntas politómicas de siete categorías para evaluar la intensidad y el nivel de aceptación del olor: ¿Huele a petróleo crudo? ¿Es agradable o desagradable? (Fig. S1) (López-

Aguilar et al., 2020). Se compararon las respuestas entre las poblaciones rurales y con los resultados del estudio previo en la población urbana.

La intensidad de olor hace referencia a si la muestra tiene mucho olor o poco olor, teniendo un nivel aprobatorio cuando los panelistas reportaron la categoría de “olor bajo” con un valor de  $\leq 3$ . De igual manera, el nivel de aceptación del olor de las muestras estuvo en función de las sensaciones de aprobación o rechazo en el evaluador, siendo el valor aprobatorio para el nivel de aceptación la categoría de “ni agradable ni desagradable” con un valor neutro de  $\leq 4$ . (Tabla 1). Las muestras utilizadas fueron de suelo contaminado que recibieron un tratamiento de biorremediación y atenuación natural durante 18 meses, período en que estas muestras redujeron la concentración de HTP a niveles muy cercanos a lo que marca la normatividad.

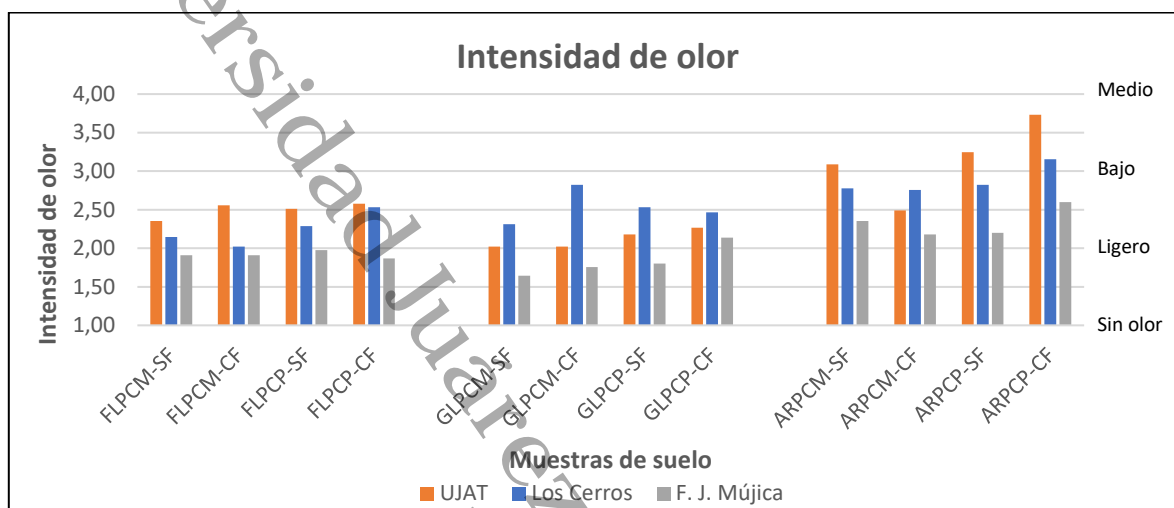
**Tabla 1.** Criterios y valores de la percepción de olor

<b>Intensidad de olor</b> ¿Huele a petróleo crudo?		<b>Nivel de aceptación de olor</b> ¿Es agradable o desagradable?	
Criterio	Valor	Criterio	Valor
Sin olor	1	Muy agradable	1
Olor ligero (apenas perceptible)	2	Medio agradable	2
Olor bajo	3	Un poco agradable	3
Olor mediano	4	Ni agradable ni desagradable	4
Olor un poco fuerte	5	Un poco desagradable	5
Olor fuerte	6	Medio desagradable	6
Olor muy fuerte	7	Muy desagradable	7

Fuente: López-Aguilar et al. (2020)

En las tres preguntas dicotómicas (si o no) y que tiene que ver con cuestiones de fertilidad, estas se elaboraron al mismo nivel de similitud. En ellas se explora la experiencia del panel con actividades ligadas al suelo. Dentro de las instrucciones proporcionadas al panel se les explicó la forma en que interpretarían este tipo de preguntas. En conjunto, las tres preguntas son de carácter confirmatorio respecto de la percepción de un suelo tratado para ser aprovechado con fines agrícolas. De manera general, las respuestas obtenidas de estas preguntas fueron muy similares por los panelistas. El olor percibido en las muestras de Fluvisol y Gleysol tuvieron una aceptación en las comunidades rurales de entre 60 % y 96 % de que huelen a tierra normal, a tierra buena y sirven para sembrar, mientras que entre los panelistas de la UJAT estos porcentajes fueron de 37 % y 62 %. Para el caso de las muestras de suelo Arenosol, tuvieron una aceptación muy inferior, que iban desde 37 % hasta 73 % de su olor a tierra normal, a tierra buena y que sirve para sembrar. En la medida que las comunidades están familiarizadas con los olores a hidrocarburos, la percepción de

olor a tierra normal, a tierra buena y qué sirve para sembrar, es mayor. Los mayores niveles de aprobación se registraron en los panelistas de la comunidad Francisco J. Mujica y las menores en los panelistas de la UJAT.

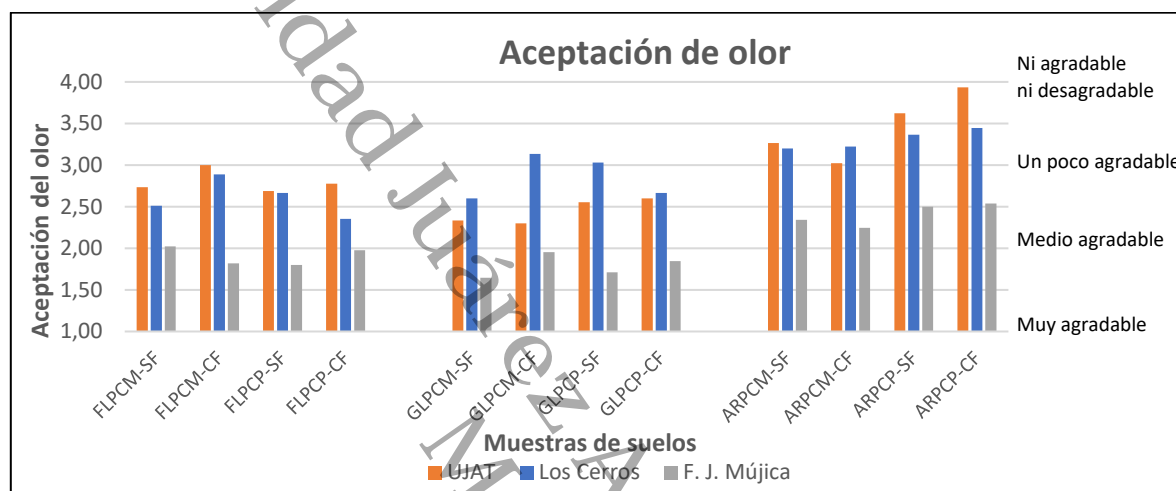


FL=Fluvisol; GL=Gleysol; AR=Arenosol; PCM= Petróleo Crudo Mediano; PCP=Petróleo Crudo Pesado; SF=Sin Fertilizante; CF=Con Fertilizante

**Figura 2.** Evaluación de la Intensidad de olor entre panelistas urbanos y rurales.

Se observó que la intensidad del olor (Fig. 2) era más alta para la población urbana (UJAT) que para las poblaciones rurales, tanto en Fluvisol como en Arenosol. Esto puede deberse a una exposición generalmente mayor a los olores terrosos en las comunidades rurales, de modo que los suelos en sí mismos no parecen tan malolientes como lo son para la población urbana menos experimentada. Del mismo modo, es más común en las comunidades rurales que las personas tengan cierta experiencia en el mantenimiento de maquinaria (como bombas de agua, motosierras, reparaciones de camiones, cambios de aceite, etc.), lo que puede hacer que estén más acostumbrados a algunos olores de hidrocarburos, especialmente lubricantes usados y combustibles. En el Gleysol (pasto inundable), se observó que la intensidad del olor era menor en la población urbana que en la población rural sin actividad petrolera o derrames cercanos (Los Cerros), pero mayor que en la población rural con experiencia previa en petróleo (F.J. Mújica). Es posible que, en Los Cerros, generalmente haya menos exposición a los suelos inundables y la percepción del olor fue exagerada para esta población debido a los olores anóxicos relacionados con este suelo inundable. Esta comunidad está ubicada en depósitos aluviales relativamente altos, (Fluvisoles) aproximadamente a dos o cuatro metros sobre la llanura aluvial circundante (principalmente

Gleysols), (Jiménez-Ramírez, 2013). Entre las poblaciones rurales, la intensidad percibida del olor fue consistentemente mayor en la comunidad sin experiencia previa en derrames de petróleo o actividad petrolera, probablemente debido a que la comunidad expuesta se acostumbró a los olores típicos del petróleo o los hidrocarburos en general. Como se señaló, entre las poblaciones rurales, en todas las muestras de suelo, la intensidad del olor estaba en el rango aceptable (< 3) o casi (3.16 en el Arenosol con crudo pesado, con fertilización).



FL=Fluvisol; GL=Gleysol; AR=Arenosol; PCM= Petróleo Crudo Mediano; PCP=Petróleo Crudo Pesado; SF=Sin Fertilizante; CF=Con Fertilizante

**Figura 3.** Evaluación de nivel de aceptación del olor entre panelistas urbanos y rurales.

Las tendencias en la aceptación del olor (Fig. 3) fueron muy similares a las de la intensidad del olor, pero hubo menos diferencia entre la población urbana (UJAT) y la población rural sin exposición a la actividad petrolera (Los Cerros). En algunos casos eran casi iguales o la tendencia se invirtió ligeramente. Para las muestras de Fluvisol y Arenosol, los valores de aceptabilidad promedio en la población urbana fueron generalmente 1-8 % más altos (menos agradables) que en Los Cerros en esta escala (no cero). Esta tendencia fue más pronunciada en las muestras contaminadas con crudo pesado y biotratadas con la adición de fertilizantes, con valores de 15 y 12 % más altos para la población urbana, en esta escala. Sin embargo, uno de los valores (Arenosol contaminado con crudo medio y tratado con fertilizante) fue 7 % más bajo (menos desagradable) en la comunidad de Los Cerros que en la población universitaria (urbana).

Con respecto a las muestras de Gleysol, los valores de aceptabilidad en la comunidad rural sin exposición previa al petróleo (Los Cerros) fueron los mismos que para la población universitaria (para suelos contaminados con crudo pesado) o 12-13 % menos (menos desagradable, para suelo

contaminado con crudo medio). Como se mencionó anteriormente, la comunidad de Los Cerros parece ser especialmente sensible a los olores anóxicos de los Gleysoles, con respecto tanto a la otra comunidad rural como a la comunidad urbana, y esto puede afectar la tendencia general encontrada en la aceptación entre las poblaciones urbano y rural. Sin embargo, parecería que con respecto a las muestras de Gleysol, aunque en la comunidad de Los Cerros la intensidad percibida del olor fue algo mayor (más notable para este grupo, Fig. 2), no fue repugnante. Por lo tanto, aunque se percibe que la intensidad es relativamente alta en esta comunidad rural, generalmente no se considera un olor desagradable. Las percepciones para este tipo de suelo en esta comunidad variaron de "medio agradable" a "un poco agradable".

Con respecto a la comunidad rural previamente expuesta al petróleo (F.J. Mújica), los valores de aceptabilidad registrados fueron consistentemente mucho menos (menos desagradables) que en la comunidad rural no expuesta previamente (15 – 44 % menos), y generalmente mucho menos que en la población urbana (comúnmente 25 – 44 % menor). El olor en la comunidad rural con exposición previa al petróleo no se consideró desagradable, todas las muestras eran neutrales (valor de 4, ni agradable ni desagradable), o menos. Queda demostrado así, que, los sujetos asocian sus experiencias adquiridas de sus entornos para calificar de diferentes maneras sus percepciones (Torricela et al., 2007).

### **3.7 Análisis estadístico**

En el estudio anterior se reportó mediante el estadístico de Rho de Spearman que existe evidencia estadística de que las relaciones entre la percepción del olor con los factores de fertilidad y concentración de HTP son mínimas. En su mayoría, estas relaciones mostraron correlaciones de “bajas” y “muy bajas” y a veces hasta inversa de lo esperado (López-Aguilar et al., 2020). Para comparar los datos obtenidos en la prueba de intensidad y grado de aceptación del olor (variables ordinales) entre las tres comunidades se realizó un Análisis de Varianza (ANOVA) y Prueba de Múltiples Rangos (PMR) (Tabla 2) con un nivel de significancia de  $\alpha=0.05$  utilizando el paquete estadístico IBM SPSS Statistics 20 para Windows y Statgraphics (Lotufo et al., 2015; Watts et al., 1992), obteniendo los siguientes resultados:

**Tabla 2.** Análisis de Varianzas (ANOVA) y Prueba de Múltiples Rangos (PMR)

MUESTRA	INTENSIDAD DE OLOR		ACEPTACION DE OLOR	
	Significancia (P)	Diferencia entre medias	Significancia (P)	Diferencia entre medias
FLPCM	0.0837	No existen diferencias estadísticamente significativas	0.0944	No existen diferencias estadísticamente significativas
FLPCP	0.0018	Existen diferencias estadísticamente significativas	0.0025	Existen diferencias estadísticamente significativas
GLPCM	0.0000	Existen diferencias estadísticamente significativas	0.0006	Existen diferencias estadísticamente significativas
GLPCP	0.0066	Existen diferencias estadísticamente significativas	0.000	Existen diferencias estadísticamente significativas
ARPCM	0.0136	Existen diferencias estadísticamente significativas	0.0000	Existen diferencias estadísticamente significativas
ARPCP	0.0009	Existen diferencias estadísticamente significativas	0.0000	Existen diferencias estadísticamente significativas

FL= Fluvisol; GL= Gleysol; AR= Arenosol; PCM= Petróleo Crudo Mediano; PCP= Petróleo Crudo Pesado

Para la mayoría de suelos se observó una diferencia significativa entre las poblaciones. Únicamente con el suelo tipo Fluvisol contaminado con petróleo crudo mediano no fue posible demostrar una diferencia estadísticamente significativa, aunque las tendencias en el comportamiento de los datos son congruentes con los demás suelos contaminados. Puesto que el valor P (0.0837) de la razón F (2.9400) es mayor que 0.05, no se podría asegurar que exista una diferencia estadísticamente significativa entre la media de intensidad de olor de las muestras FLPCM entre un grupo de panelistas y otro. Esta situación también se cumplió para este suelo para el parámetro de aceptabilidad. No se pudo demostrar que existan diferencias estadísticamente significativas entre la media de aceptación de olor de las mismas muestras, puesto que el valor P (0.0944) de la razón F (2.7700) es mayor de 0.05 entre un nivel de panelistas y otro, con un nivel del 95.0 % de confianza en ambos casos. En el resto de las muestras se observaron que los valores de P tanto en la intensidad como en la aceptación de olor son inferiores de 0.05 ( $P < 0.05$ ), lo que nos indica que existen diferencias estadísticamente significativas entre un grupo de panelistas y otro, para un nivel de 95.0 % de confianza.



### 3.8 Relación entre olor, fertilidad del suelo y toxicidad

En las Tablas 3, 4, 5 y 6 se resume la información necesaria para determinar si el olfato puede considerarse como un instrumento válido para evaluar la eficiencia de los proyectos de remediación de suelos contaminados con petróleo crudo, respondiendo a la pregunta de investigación: Cuando la gente dice “está bien”, realmente ¿está bien? Para ello se valoraron los parámetros de repelencia y capacidad de campo con los niveles de intensidad y aceptación de olor. Para las muestras de suelo Fluvisol (Tablas 3 y 5), los parámetros de fertilidad evaluados en el laboratorio indicaron afectaciones en la relación suelo-agua, presentando repelencia con un nivel de severidad de moderada a muy severa, con una persistencia de fuerte a extrema y con una reducción en la capacidad de campo de 28.30 % a 43.54 %. Estos resultados pudieran tomarse con cierta reserva, ya que estos análisis en laboratorio se efectuaron con suelo seco. Al calcular la humedad crítica se observó que, a determinados niveles de humedad, estos suelos pueden reducir la repelencia al agua, tal y como ocurre en condiciones de campo, que incluso en temporadas de estiaje, estos suelos arcillosos conservan suficiente humedad (Adams et al., 2008a; Marín-García et al., 2016)

El período de intemperización permitió reducir los niveles de toxicidad a niveles aceptables al no registrarse mortandad de los organismos de prueba. Así también, los niveles de intensidad y aceptación de olor en las pruebas de percepción fueron bastante tolerantes. Al juzgar la pregunta de cuando la gente dice “Está bien”, realmente ¿está bien?, se puede apreciar que en los parámetros de fertilidad se generan “falsos positivos”, toda vez que, a pesar de que los panelistas percibieron el proceso de remediación como aceptable, la lectura de los parámetros indicó lo contrario. Es decir que, para efectos de la prueba de percepción de olor, este criterio solo parece confiable en la toxicidad, pero no en fertilidad.

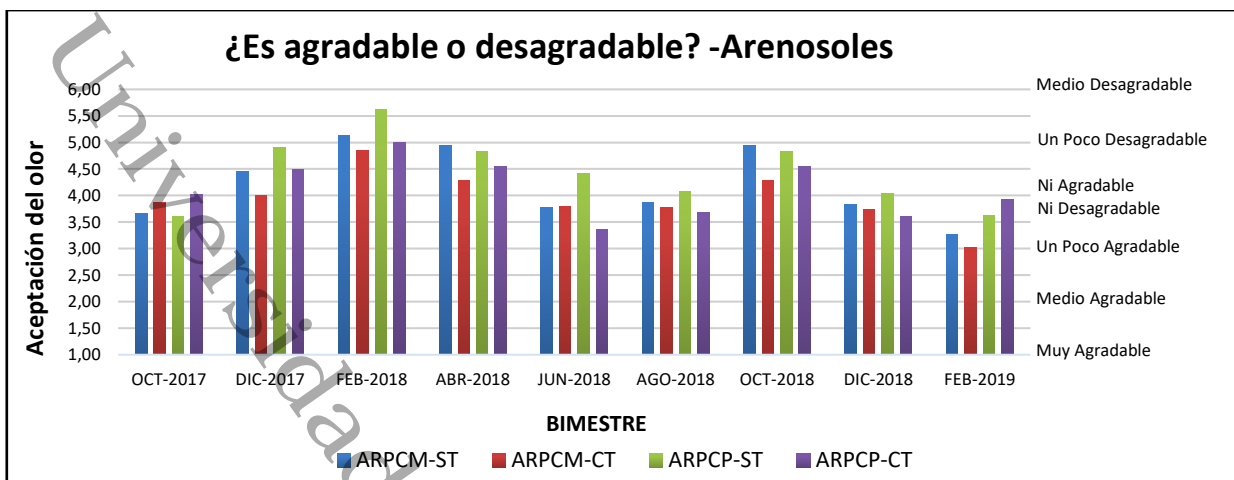
Para efectos de las muestras de suelo Gleysol (Tablas 3 y 5), la percepción olfativa era confiable. Aunque se presentaron problemas en repelencia en una de las muestras analizada en laboratorio, esta probablemente no refleja los efectos reales de repelencia al agua en campo. Para este caso, la repelencia y la capacidad de campo en laboratorio no son factores determinantes en condiciones de campo, ya que, debido a su ubicación en el paisaje, estos suelos se localizan en sitios bajos e inundables, lo que les permite mantenerse húmedos aun en temporada de sequía (> 80 % de capacidad de campo) (Adams *et al.*, 2008a). Los pastos y la vegetación pantanosa del sitio no muestran signos evidentes de estrés por agua, por lo que los falsos positivos en fertilidad no aplican (N.A.). Esto quedó demostrado al calcular en el laboratorio la humedad crítica en muestras de

Gleysol contaminadas con petróleo crudo tipo pesado, que con humedad de entre 14.09 % y 18.04 %, estos suelos pueden no ser repelentes al agua en condiciones de campo.

La percepción de olor en las muestras de suelo Arenosol pareció ser confiable como criterio para toxicidad, pero definitivamente no era confiable para fertilidad (Tablas 4 y 6). Este suelo presentó repelencia a un nivel de severidad de “muy severo”, con una persistencia extrema y con una reducción de la capacidad de campo de 19.90 % a 58.82 %. No registró mortandad de organismos en la prueba de toxicidad. Los niveles de intensidad y aceptación de olor fueron aceptables, generando con ello “falsos positivos”.

Un aspecto de notar en esta interpretación de los datos es que estas pruebas en las comunidades rurales se realizaron con las muestras de suelo ya tratados por biorremediación o atenuación natural. Como fue mostrado anteriormente (López-Aguilar et al., 2020), estas muestras no presentaron toxicidad aguda y en todos los suelos fueron con olores aceptables para la población urbana. En el actual estudio se confirma esta tendencia. Para las dos poblaciones rurales, aunque hay diferencias, todos mostraron una aceptación del olor de las muestras tratadas. Sin embargo, existe la cuestión de la aceptación antes de que realmente estuvieron suficientemente tratadas. Esto es un punto de especial importancia en la comunidad con experiencia previa a derrames de petróleo, en donde en general la intensidad del olor a petróleo fue percibida a ser menor y, así también la aceptación era mayor.

En el estudio anterior sobre la población urbana (UJAT), todos los valores de aceptación para Fluvisoles y Gleysols fueron generalmente lo suficientemente bajos (no lo suficientemente desagradables) como para considerarse aceptables durante toda la duración del estudio. Sin embargo, en el Arenosol, hubo varios meses de tratamiento que estaban por encima del nivel aceptable (4 - ni agradable ni desagradable), especialmente en el segundo, tercer y cuarto trimestres, y nuevamente en el séptimo trimestre (Fig. 4).



AR=Arenosol; PCM= Petróleo Crudo Mediano; PCP=Petr leo Crudo Pesado; SF=Sin Fertilizante; CF=Con Fertilizante  
Desarrollado de López-Aguilar et al. 2020

**Figura 4.** Evaluación de la aceptación de olor en suelo Arenosol por panelistas urbanos.

Dado que, en las comunidades rurales, la sensibilidad es diferente, es probable que el valor de percepción sea un poco más bajo (menos desagradable), especialmente en una comunidad rural previamente expuesta a derrames de hidrocarburos (el escenario más probable). Los datos del presente estudio indicaron que, para las muestras de Arenosol, los valores para la aceptabilidad del olor a hidrocarburos en suelos contaminados estaban en el rango de 25 a 35 % menos (percibido como menos desagradable) en la comunidad rural previamente expuesta que en la población universitaria. Por lo tanto, es posible que cuando la población universitaria perciba las muestras de Arenosol contaminadas en el rango de valores de aceptabilidad de 4-5 (inaceptable), en la población rural, previamente expuesta, solo habrían informado un valor de aceptabilidad promedio de aproximadamente 2.6 - 3.75.

Estos valores están claramente en el rango aceptable de acuerdo con esta escala, pero aún podrían ser tóxicos, especialmente durante el tercer bimestre. En este punto de la remediación, el contenido de TPH era de aproximadamente 7000 - 9000 mg kg<sup>-1</sup> para suelos contaminados con petróleo crudo medio, y aproximadamente 12000 mg kg<sup>-1</sup> para suelos contaminados con petróleo crudo pesado. En el estudio original, no se encontró toxicidad (mortalidad) en los bimestres penúltimo y antepenúltimo en las muestras de Arenosol, pero hubo una diferencia importante en la biomasa de lombrices de tierra. Parece que, en esta última etapa, no hubo ninguna toxicidad química directa, pero hubo condiciones insalubres del suelo para el crecimiento de lombrices de tierra (baja capacidad de campo, repelencia al agua). Como se muestra en esta evaluación, existe un riesgo en comunidades rurales previamente expuestas, especialmente con suelos arenosos, que

incluso cuando los propietarios generalmente sienten que el olor del suelo es aceptable, aún puede haber cierta toxicidad, especialmente en los primeros meses de la biorremediación o atenuación natural. En el clima tropical del monzón del área de estudio, esto probablemente ocurriría durante los primeros seis meses de tratamiento biológico. En climas templados o fríos, este período probablemente sea mucho más largo, posiblemente dos o tres veces más largo. Si el propietario de la propiedad acepta la remediación del sitio en esta etapa, existe la posibilidad de que los organismos del suelo se vean afectados y la recuperación a largo plazo de la fertilidad del suelo se retrase durante un período prolongado de tiempo. Sin embargo, es muy improbable que el ganado se vea directamente afectado por la toxicidad, ya que solo consumen cantidades muy pequeñas de tierra (Adams & Morales-García, 2008b).

Sin embargo, estas tendencias de datos podrían usarse si se hicieran y puntuaran las observaciones (aceptación de olores) de varios miembros de la comunidad afectada. Según el promedio de los valores calificados, un multiplicador de aproximadamente 1.6 sería apropiado y generalmente conservador, de acuerdo con estos datos. El promedio de los datos de aceptación de la población urbana (UJAT) en comparación con la comunidad rural anteriormente expuesta (F.J. Mújica) fue de  $1.455 \pm 0.153$ . Si el valor ajustado estuviera en 4 (neutral) o menos (menos desagradable), generalmente debería ser seguro aceptar el proyecto de remediación en función de la toxicidad del suelo (pero no necesariamente en función de la fertilidad del suelo).

**Tabla 3.** Análisis de cuando la gente dice “está bien”, realmente ¿está bien? en suelos Fluvisol y Gleysol -Ría. Los Cerros

MUESTRA	PARAMETROS						OLOR				¿ESTÁ BIEN?					Falsos positivos	
	Repelencia			% Reducción en Capacidad de Campo	Toxicidad % Mortandad	Intensidad		Aceptación		PARAMETROS SUELO			PERC. OLOR		Toxicidad	Fertilidad	
	MED (Molaridad alc. etílico)	Clasificación Severidad	WDPT (s)			Clasificación Persistencia	Valor	Clasificación	Valor	Clasificación	REP.	C.C.	Toxicidad	Intensidad			Aceptación
FLPCM-SF	2.11	Moderada	209.50	Fuerte	38.35	0	2.15	Ligero-bajo	2.51	Medio agradable-Poco agradable	Si*	No	Si	Si	Si	No	Si
FLPCM-CF	2.81	Severa	>3,600	Extrema	43.54	0	2.02	Ligero-bajo	2.89	Medio agradable - Poco agradable	Si*	No	Si	Si	Si	No	Si
FLPCP-SF	3.46	Muy severa	609.59	Severa	42.73	0	2.29	Ligero-bajo	2.67	Medio agradable-Poco agradable	Si*	No	Si	Si	Si	No	Si
FLPCP-CF	3.76	Muy severa	>3,600	Extrema	28.30	0	2.53	Ligero-bajo	2.35	Medio agradable-Poco agradable	Si*	No	Si	Si	Si	No	Si
GLPCM-SF	0.00	No repelente	12.83	Ligera	56.03	0	2.31	Ligero-bajo	2.60	Medio agradable-Poco agradable	Si	No	Si	Si	Si	No	N.A.
GLPCM-CF	0.00	No repelente	25.33	Ligera	51.35	0	2.82	Ligero-bajo	2.60	Medio agradable-Poco agradable	Si	No	Si	Si	Si	No	N.A.
GLPCP-SF	0.62	Baja	89.04	Fuerte	44.51	0	2.53	Ligero-bajo	3.03	Poco agradable	Si	No	Si	Si	Si	No	N.A.
GLPCP-CF	2.00	Moderada	246.76	Fuerte	39.46	0	2.47	Ligero-bajo	2.67	Medio agradable-Poco agradable	Si*	No	Si	Si	Si	No	N.A.

FL= Fluvisol; GL= Gleysol; PCM= Petróleo Crudo Mediano; PCP= Petróleo Crudo Pesado; CF= Con fertilizante; SF= Sin Fertilizante

\*En condiciones de campo probablemente no son repelentes

N.A.= No aplica. En campo estos suelos conservan abundante humedad (> 80% de capacidad de campo)

**Tabla 4.** Análisis de cuando la gente dice “está bien”, realmente ¿está bien?, en suelo Arenosol -Ría. Los Cerros

MUESTRA	PARAMETROS						OLOR				¿ESTÁ BIEN?					Falsos positivos	
	Repelencia			Clasificación Persistencia	% Reducción en Capacidad de Campo	Toxicidad % Mortandad	Intensidad		Aceptación		PARAMETROS SUELO			PERC. OLOR		Toxicidad	Fertili-dad
	MED (Molaridad alc. etílico)	Clasificación Severidad	WDPT (s)				Valor	Clasificación	Valor	Clasificación	REP .	C.C.	Toxicidad	Inten-sidad	Acepta-cion		
ARPCM-SF	5.34	Muy severa	>3,600	Extrema	48.93	0	2.78	Ligero-bajo	3.20	Poco agradable-Ni agradable ni desagradable	No	No	Si	No	Si	No	Si
ARPCM-CF	5.12	Muy severa	>3,600	Extrema	58.82	0	2.76	Ligero-bajo	3.22	Poco agradable-Ni agradable ni desagradable	No	No	Si	Si	Si	No	Si
ARPCP-SF	5.46	Muy severa	>3,600	Extrema	23.23	0	2.82	Ligero-bajo	3.37	Poco agradable-Ni agradable ni desagradable	No	No	Si	Si	Si	No	Si
ARPCP-CF	5.34	Muy severa	>3,600	Extrema	19.90	0	3.16	Bajo-mediano	3.44	Poco agradable-Ni agradable ni desagradable	No	No	Si	No	Si	No	Si

AR= Arenosol; PCM= Petróleo Crudo Mediano; PCP= Petróleo Crudo Pesado; CF= Con fertilizante; SF= Sin Fertilizante

**Tabla 5.** Análisis de cuando la gente dice “está bien”, realmente ¿está bien? en suelos Fluvisol y Gleysol -Ría. Francisco J. Mújica

MUESTRA	PARAMETROS						OLOR				¿ESTÁ BIEN?					Falsos positivos	
	Repelencia				% Reducción en Capacidad de Campo	Toxicidad % Mortan- dad	Intensidad		Aceptación		PARAMETROS			PERC. OLOR			
	MED (Molaridad alc. etílico)	Clasificaci ón Severidad	WDPT (s)	Clasificación Persistencia			Valor	Clasificación	Valor	Clasificación	REP.	C.C.	Toxici- dad	Inten- sidad	Acepta- cion	Toxici- dad	Fertili- dad
FLPCM-SF	2.11	Moderada	209.50	Fuerte	38.35	0	1.91	Sin olor- Ligero	2.02	Medio agradable	Si*	No	Si	Si	Si	No	Si
FLPCM-CF	2.81	Severa	>3,600	Extrema	43.54	0	1.91	Sin olor- Ligero	1.82	Muy agradable- Medio agradable	Si*	No	Si	Si	Si	No	Si
FLPCP-SF	3.46	Muy severa	609.59	Severa	42.73	0	1.98	Sin olor- Ligero	1.80	Muy agradable- Medio agradable	Si*	No	Si	Si	Si	No	Si
FLPCP-CF	3.76	Muy severa	>3,600	Extrema	28.30	0	1.87	Sin olor- Ligero	1.98	Muy agradable- Medio agradable	Si*	No	Si	Si	Si	No	Si
GLPCM-SF	0.00	No repelente	12.83	Ligera	56.03	0	1.64	Sin olor- Ligero	1.64	Muy agradable- Medio agradable	Si	No	Si	Si	Si	No	N.A.
GLPCM-CF	0.00	No repelente	25.33	Ligera	51.35	0	1.76	Sin olor- Ligero	1.96	Muy agradable- Medio agradable	Si	No	Si	Si	Si	No	N.A.
GLPCP-SF	0.62	Baja	89.04	Fuerte	44.51	0	1.80	Sin olor- Ligero	1.71	Muy agradable- Medio agradable	Si	No	Si	Si	Si	No	N.A.
GLPCP-CF	2.00	Moderada	246.76	Fuerte	39.46	0	2.14	Ligero-bajo	1.84	Muy agradable- Medio agradable	Si*	No	Si	Si	Si	No	N.A.

FL= Fluvisol; GL= Gleysol; PCM= Petróleo Crudo Mediano; PCP= Petróleo Crudo Pesado; CF= Con fertilizante; SF= Sin Fertilizante

\*En condiciones de campo probablemente no son repelentes

N.A.= No aplica. En campo estos suelos conservan abundante humedad (> 80% de capacidad de campo)

**Tabla 6.** Análisis de cuando la gente dice “está bien”, realmente ¿está bien?, en suelo Arenosol -Ría. Francisco J. Mújica

MUESTRA	PARAMETROS				OLOR				¿Está bien?				Falsos positivos				
	MED (Molaridad alc. etílico)	Repelencia		% Reducción en Capacidad de Campo	Toxicidad % Mortan- dad	Intensidad		Aceptación		PARAMETROS		PERC. OLOR		Toxici- dad	Fertili- dad		
		Clasificación Severidad	WDPT (s)			Clasificación Persistencia	Valor	Clasificación	Valor	Clasificaci- ón	REP.	C.C.	Toxici- dad			Inten- sidad	Acept- ación
ARPCM-SF	5.34	Muy severa	>3,600	Extrema	48.93	0	2.36	Ligero-bajo	2.34	Medio agradable- Un poco agradable	No	No	Si	No	Si	No*	Si
ARPCM-CF	5.12	Muy severa	>3,600	Extrema	58.82	0	2.18	Ligero-bajo	2.24	Medio agradable- Un poco agradable	No	No	Si	Si	Si	No*	Si
ARPCP-SF	5.46	Muy severa	>3,600	Extrema	23.23	0	2.20	Ligero-bajo	2.50	Medio agradable- Un poco agradable	No	No	Si	No	Si	No*	Si
ARPCP-CF	5.34	Muy severa	>3,600	Extrema	19.90	0	2.60	Ligero-bajo	2.54	Medio agradable- Un poco agradable	No	No	Si	No	Si	No*	Si

AR= Arenosol; PCM= Petróleo Crudo Mediano; PCP= Petróleo Crudo Pesado; CF= Con fertilizante; SF= Sin Fertilizante

\*Nota: Aunque los valores de toxicidad al final del tratamiento no se mostraron incongruencias entre toxicidad aguda y la aceptación, existe la posibilidad que durante los primeros meses de tratamiento (seis) podría haber una situación de aceptación por la comunidad rural con experiencia previa a derrames, aunque todavía exista cierta toxicidad.



## Conclusiones

Con respecto a la percepción del olor del suelo entre los panelistas rurales, los resultados fueron relativos en términos contextuales, ya que influenciados por factores del entorno tales como el ambiente de sus comunidades, cada grupo de individuos percibieron de diferente manera los olores de los suelos tratados. Las tendencias para la intensidad de olor y el nivel de aceptación entre los panelistas de la comunidad urbana y la comunidad rural sin exposición a las actividades petroleras (Los Cerros) fueron muy similares para los suelos Fluvisol y Arenosol, aunque fueron los panelistas urbanos quienes calificaron más altos estos dos criterios. Sin embargo, en el suelo Gleysol, los panelistas de la comunidad Los Cerros fue quien calificó con niveles más altos la intensidad y la aceptación de los olores. Las respuestas de la segunda comunidad rural, la Ría. Francisco J. Mújica, fueron muy diferentes a los otros dos paneles, ellos percibieron a un nivel mucho más bajo la intensidad y con mayor grado de aceptación los olores de los tres suelos tratados. De igual manera, aunque aprobatorio, el Arenosol tuvo el menor grado de aceptación entre los tres grupos de panelistas. Con base a estos resultados, se concluye que, como criterio *de facto*, el olor del suelo generalmente es confiable para evaluar la toxicidad aguda de estos suelos y probablemente confiable para evaluar la fertilidad en el Gleysol. Sin embargo, es posible que, para comunidades con experiencia con derrames de petróleo, durante los primeros meses de remediación en suelo Arenosol se podría percibir el olor del suelo como aceptable aun cuando existiera toxicidad aguda. De igual forma, este criterio por sí solo no sería confiable para evaluar la fertilidad de los suelos Fluvisol y Arenosol y debería evitarse.

## Agradecimientos

Agradecemos al Laboratorio de Remediación de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco y a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Ciencias de Ciencias y Artes de Chiapas por el apoyo logístico y financiero. Asimismo, a Liliana Hernández Acosta, Francisco Javier Guzmán Osorio, Gerónimo Álvarez Coronel, José de los Santos Pascual Chablé y Fidel Arias López por su asistencia técnica; a los habitantes de las comunidades que participaron en la prueba de olor y en especial a las delegadas: Sra. Teresa García de la Cruz y Sra. Lucía Izquierdo Morales por las facilidades en la realización de este estudio.

## Nomenclatura

UJAT	Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
Ría	Ranchería
FL	Fluvisol
GL	Gleysol
AR	Arenosol
PCM	Petróleo Crudo Mediano
PCP	Petróleo Crudo Pesado
SF	Sin Fertilizante
CF	Con Fertilizante
MED	Molarity ethanol droplet (Molaridad de la gota de etanol)
WDPT	Water droplet penetration time (Tiempo de penetración de una gota de agua)
N.A.	No Aplica
Rep.	Repelencia
CC	Capacidad de Camapo

## Referencias

- Adams, R. H., Domínguez Rodríguez, V. I., & Carrillo, L. V. (2002). Evaluation of microbial respiration and ecotoxicity in contaminated soils representative of the petroleumproducing region of southeastern Mexico. *Terra Latinoamericana*, 20(3), 253-265.
- Adams, R. H., Guzmán-Osorio, F. J., & Zavala-Cruz, J. (2008a). Water repellency in oil contaminated sandy and clayey soils. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 5(4), 445-454.
- Adams, R. H., & Morales-García, F. A. (2008b). Concentración residual de hidrocarburos en suelo del trópico. I: Consideraciones para La salud pública y protección al ganado. *Interciencia*, 33(7), 476-482.
- Aguilar-Aguilar, V. (2014). *Evaluación de las tecnologías de remediación in situ biovente y biolabranza empleadas en suelo contaminado con hidrocarburos de petróleo crudo en la R/a Cumuapa 2a. sección, en Cunduacán, Tabasco*. Tesis de Maestría en Ingeniería y Protección Ambiental, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, México.
- Álvarez-Coronel, G., Domínguez-Rodríguez, V. I., Adams, R. H., Palma-López, D. J., & Zavala-Cruz, J. (2020). The role of soil clays in mitigating or exacerbating impacts to fertility in crude-oil contaminated sites. *Journal of Tropical Agricultural Science*, 43(2) (In press).
- COA. (2017). Código Orgánico del Ambiente. Registro Oficial Suplemento 983, Publicado el 12 de Abril de 2017. Ecuador: Ministerio del Ambiente.
- Discovery Channel. (2007). Recuperación de Suelos, ¿Cómo Lo Resuelven?. Documental film about the remediation of the 18 de Marzo oil refinery in Mexico City. Discovery Networks Latin America, 25 Noviembre 2007, Silver Spring, Maryland, USA. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=rl6fk40GnRc>
- INEGI. (2017). Marco Geoestadístico 2017. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México.
- INEGI. (2018a). Conjunto de datos vectoriales de información topográfica escala 1:50 000 serie III. Carta topográfica E15A89. Cunduacán. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México.
- INEGI. (2018b). Conjunto de datos vectoriales de información topográfica escala 1:50 000 serie III. Carta topográfica E15C19. Reforma. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México.
- INEGI. (2020). Ortofotos digitales E15A89E, E15A89F, E15C19B y E15C19C. Escala 1:20 000 Servicio WMS. . Recuperado de <http://gaia.inegi.org.mx/NLB/mdm5.wms> (Consultado 28 de julio de 2020)
- ISO. (2014). International Organization for Standardization. Standard ISO 8589:2010/A1:2014. Sensory analysis - General guidance for the design of test rooms. Geneva, Switzerland.
- Jiménez-Ramírez, R. (2013). *Clasificación y caracterización de suelos de Tabasco con base en el enfoque geomorfopedológico (Tesis de Maestría)*. Colegio de Postgraduados Campus Tabasco, H. Cárdenas, Tabasco, México.
- LGEEPA. (2018). Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. DOF, Última Reforma 05 de Junio de 2018. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México.

- López-Aguilar, S., Adams, R. H., Domínguez-Rodríguez, V. I., Gaspar-Génico, J. A., Zavala-Cruz, J., & Hernández-Nataren, E. (2020). Soil odor as an extra-official criterion for qualifying remediation projects of crude oil-contaminated soil *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 17.
- López-Padrón, M. A. (2018). *Biopilas para remediar un sitio contaminado con petróleo crudo ligero en Cunduacán, Tabasco*. Tesis de Licenciatura en Ingeniería Ambiental, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, México,
- Lotufo, H. A., Mamani, A. R., González, L. E., & Cravero Bruneri, A. P. (2015). Composición físico-química y evaluación sensorial de una pasta rellena fresca dietética con adición de fibra prebiótica. *Dieta, Ciudad Autónoma de Buenos Aires*, vol.33 no.153, 31-37.
- Marín-García, D. C., Adams, R. H., & Hernández-Barajas, R. (2016). Effect of crude petroleum on water repellency in a clayey alluvial soil. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 13(1), 55-64.
- Pueblos de México en Internet. (2020a). Los Cerros (Cunduacán, Tabasco). Disponible en <https://mexico.pueblosamerica.com/i/los-cerros-3/> Consultado el 07 de julio de 2020.
- Pueblos de México en Internet. (2020b). General Francisco J. Mújica (Cunduacán, Tabasco). Disponible en <https://mexico.pueblosamerica.com/i/general-francisco-j-mujica-2/Consultado> Consultado el 07 de julio de 2020.
- Pueblos de México en Internet. (2020c). Cumuapa 2a. Sección (Cunduacán, Tabasco). Disponible en <https://mexico.pueblosamerica.com/i/cumuapa-2a-seccion/> Consultado el 07 de julio de 2020.
- Sanz Castrodeza, E. (2018). *Comparación de metodologías bidimensionales en análisis sensorial*. . Tesis de Maestría en Calidad, Desarrollo e Innovación de Alimentos, Universidad de Valladolid. Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias, España. Recuperado de <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/35031/TFM-L419.pdf?sequence=6>
- SEMARNAT. (2013). Norma Oficial Mexicana NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012 Que establece los límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y las especificaciones para su caracterización y remediación. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D.F. México: Diario Oficial de la Federación, 30 de octubre de 2013.
- Synnott, A. (2003). Sociología del olor (Sociology of smell). *Revista mexicana de sociología*, 65(2), 431-464.
- Trujillo-Narcia, A., Rivera-Cruz, M. C., Lagunes-Espinoza, L. C., Palma-López, D. J., Soto-Sánchez, S., & Ramírez-Valverde, G. (2012). Efecto de la restauración de un fluvisol contaminado con petróleo crudo. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 28(4), 360-374.
- Velasco, J. A., & Volke-Sepúlveda, T. L. (2003). El composteo: una alternativa tecnológica para la biorremediación de suelos en México. *Gaceta ecológica*(66), 41-53.
- Watts, B. M., Ylimaki, G. L., Jeffery, L. E., & Elías, L. G. (1992). Métodos sensoriales básicos para la evaluación de alimentos (Basic sensory methods for food evaluation). CIID, Ottawa, ON, CA.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.  
México.

## **CAPITULO IV CONCLUSIONES GENERALES**

## CAPITULO IV CONCLUSIONES GENERALES

Al someter a estudio la simulación de un derrame de petróleo crudo en tres tipos de suelo de diferentes texturas y con características propias del sureste mexicano, y de igual manera la aplicación de un tratamiento de remediación de suelos, el resultado de la simulación de biorremediación y atenuación natural fue satisfactorio en los tres tipos de suelo estudiados, al lograrse una reducción de la concentración de hidrocarburos a niveles muy próximos al límite máximo permisible por la normatividad ambiental mexicana. Al evaluar la toxicidad de los suelos tratados, se encontró que no existe evidencia alguna de toxicidad aguda en ninguno de los suelos estudiados. Los suelos con texturas medias y gruesas no recuperaron su capacidad de campo.

Respecto a la prueba percepción de olor del suelo en una comunidad urbana y dos rurales, cada grupo de panelistas percibió de diferente manera los olores de los suelos tratados. En comparación con los resultados de la comunidad urbana, las comunidades rurales percibieron los olores menos intensos y más aceptables. Al finalizar el período de tratamiento de remediación, todos los suelos estudiados fueron percibidos con niveles satisfactorios de intensidad y aceptación olfativas. Las respuestas de los individuos participantes en los tres grupos de panelistas generaron falsos positivos, ya que en muchos de los casos en donde afirmaban que los suelos “estaban bien”, realmente no lo estaban, con base en los resultados de los estudios de laboratorio.

Con estos datos podemos concluir que el olor del suelo puede considerarse un criterio *de facto* confiable para evaluar la toxicidad aguda en los suelos estudiados, y probablemente confiable para evaluar la fertilidad en el Gleysol; de manera contraria, este criterio *de facto* por sí solo no sería confiable para la evaluación de la fertilidad en el Fluvisol y Arenosol y, por consiguiente, debe evitarse para la recepción de obras de remediación.

En este trabajo se recabó información de individuos sobre la percepción de olor, y se crea un área de oportunidad para estudios a futuro que genere una metodología que mejore la prueba, en donde se trabaje con un panel seleccionado y capacitado en pruebas de percepción, y en donde además puedan participar mujeres como jueces.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.  
México.

## **ANEXOS TÉCNICOS**

## ANEXOS TÉCNICOS

### a) Observaciones sobre cómo llevar a cabo las pruebas en campo

Para efectuar la prueba de percepción de olor en suelos, se analizó cuáles serían las comunidades idóneas para que participaran. En el caso del presente estudio, las dos comunidades seleccionadas poseen características de su entorno totalmente diferentes, hecho que quedó constatado en el análisis de sus respuestas. La experiencia que nos deja este estudio en campo es de que los habitantes y autoridades de ambas comunidades se mostraron con buena disposición y actitud para participar desde el momento en que se les informó sobre los objetivos del estudio y la forma en que se llevaría a cabo. De esta experiencia, se comparte algunos aspectos de logística para futuros estudios en campo que involucren ciudadanos de comunidades rurales:

- a) Realizar las gestiones ante las instancias municipales anticipadamente.
- b) Apoyarse de los representantes de las comunidades para invitar a los habitantes a participar.
- c) Fijar una fecha y un horario para realizar la prueba.
- d) Preparar con anticipación las muestras a analizar.
- e) Procurar un área amplia, limpia y ventilada para instalar los paneles.
- f) Instalar los paneles con anticipación.
- g) Ser puntuales y llevar los materiales requeridos.
- h) Informar de manera clara a los participantes el objetivo de la prueba, los posibles riesgos a los que se exponen y a la libertad de abandonar la prueba si así lo consideran necesario.
- i) Al realizar las pruebas en campo, es importante considerar las edades de los panelistas.
- j) Se recomienda que sean personas adultas con edades comprendidas entre 25 y 50 años. En este rango de edades se estima un olfato sano y experiencia personal.
- k) Considerar en el análisis de respuestas aspectos del entorno de los panelistas.
- l) Como una forma de agradecer la participación de los habitantes, ofrecer un refrigerio al final de la prueba.



## b) Observaciones de la percepción de la mujer (Caso en la comunidad Francisco J. Mújica)

Cuando se diseñó la prueba de percepción de olor, se estableció la participación exclusiva de individuos varones, ya que, por lo general en campo, por su experiencia, son los que toman decisiones con respecto a los asuntos relacionados a los predios.

Como experiencia de la prueba, en la comunidad rural Francisco J. Mújica, se permitió la participación de una mujer de 40 años con experiencia en actividades de la industria petrolera y, aunque no se contabilizó sus respuestas, fue interesante observar que sus calificaciones en cuanto a la percepción de olor en términos de aceptabilidad fueron consistentes con valores más altos (menos agradables) y en el caso del Arenosol, con Petróleo Crudo Pesado, estaba un poco por arriba del nivel neutral, no fue aceptable para ella. Igualmente, se requeriría repetir el estudio con más mujeres, pero es congruente con la literatura, ya que el sexo es una variable significativa, es decir, las mujeres parecen tener un olfato cualitativamente mejor que el de los varones (Toledano et al., 2003).

En el futuro, mientras más mujeres participan en la toma de decisiones en campo, es probable que sean más exigentes. En un caso como Francisco J. Mújica, esto sería bueno, para evitar la aceptación de remediaciones incompletas. Igual, no sabemos que tanto su experiencia en la industria petrolera pudiera haber modificado su percepción. Tal vez otras mujeres serían más sensibles todavía (tal vez demasiado para realmente aceptar remediaciones en donde no se presente realmente toxicidad).

En un futuro, se podría incluir a mujeres dentro de los panelistas, o bien, establecer que los paneles sean mixtos o paneles constituidos exclusivamente por mujeres, dependiendo del caso.

**Tabla 1A.** Comparación de respuestas de una mujer participante y las respuestas promedio de los varones en la comunidad Francisco J. Mújica.

Muestra	MUJER				VARONES			
	Intensidad	Desv. Est.	Aceptación	Desv. Est.	Intensidad	Desv. Est.	Aceptación	Desv. Est.
FLPCM	1.50	0.84	2.50	1.38	1.91	1.68	1.82	1.11
FLPCP	2.50	1.05	2.50	1.05	1.92	1.30	1.89	0.90
GLPCM	2.67	1.63	3.83	1.94	1.70	1.06	1.80	0.90
GLPCP	4.00	1.10	3.33	1.97	1.97	1.27	1.78	0.80
ARPCM	1.33	0.52	3.33	1.03	2.27	1.35	2.29	1.35
ARPCP	3.50	1.52	4.33	1.37	2.40	1.19	2.52	1.46

**c) Observaciones sobre la percepción de personas que han trabajado en remediación/industria petrolera vs los que no han trabajado en estas actividades (Caso en la comunidad Francisco J. Mújica)**

Por su ubicación, en la comunidad Francisco J. Mújica la mayoría de los predios son inundables y arcillosos de tipo Gleysol, además, próximos a esta comunidad se encuentran instalaciones petroleras del Activo de Producción Samaria, de Petróleos Mexicanos, por lo que los habitantes están familiarizados con olores de su entorno (materia orgánica en descomposición y olor a hidrocarburos), lo que hizo que las percepciones de olor en las muestras evaluadas fueron calificadas en intensidad con promedios muy bajos y niveles satisfactorios de aceptación.

Entre los panelistas, hubo un individuo de 41 años de edad con experiencia en labores propias de procesos de remediación y en actividades relacionadas con la industria petrolera. Sus respuestas en cuanto a la intensidad y aceptación del olor fueron, inclusive, inferiores a la mayoría de los individuos que no han desempeñado las mismas actividades, esto demuestra que la influencia del entorno generaliza la percepción y que sus olfatos están adaptados a los olores aceptándolos como normal.

**Tabla 2A.** Percepción de personas con experiencia vs personas sin experiencia en remediación/industria petrolera

Muestra	PERSONA CON EXPERIENCIA				PERSONAS SIN EXPERIENCIA			
	Intensidad	Desv. Est.	Aceptación	Desv. Est.	Intensidad	Desv. Est.	Aceptación	Desv. Est.
FLPCM	1.00	0.00	1.67	0.52	1.91	1.68	1.82	1.11
FLPCP	1.17	0.41	1.50	0.55	1.92	1.30	1.89	0.90
GLPCM	1.17	0.41	1.50	0.55	1.70	1.06	1.80	0.90
GLPCP	1.17	0.41	1.17	0.41	1.97	1.27	1.78	0.80
ARPCM	1.17	0.41	2.00	1.55	2.27	1.35	2.29	1.35
ARPCP	1.50	0.84	1.83	1.60	2.40	1.19	2.52	1.46

**d) Observaciones sobre la percepción de personas adultos mayores de ambas comunidades que participaron en la prueba de olor.**

En la prueba aplicada a ambas comunidades, participaron seis individuos con edades de entre 60 y 65 años, y dos de 68 y 78 años respectivamente. A estas personas fue necesario apoyarlas para el llenado del formato. En el análisis de resultados se observó que los adultos mayores participantes, percibieron la mayoría de las muestras en términos de intensidad en niveles muy bajos (apenas perceptible) y con niveles de aceptación de manera aprobatoria, calificándolas en general como aceptables, aunque las muestras de arenosol los evaluaron con cierto rechazo. Con esto se comprobó que la edad es la variable que más influye en el olfato en sujetos normales. Muchos autores lo confirman, a mayor edad la capacidad olfativa disminuye significativamente (Toledano et al., 2003), elevando el umbral, debilitando la fuerza, la discriminación y la identificación. Después de los 65 años en promedio, los adultos mayores no pueden detectar agentes de advertencia en los gases (Stevens & Cain, 1987).

**Tabla 3A.** Percepción de adultos mayores vs personas de menor edad

Muestra	VARONES ADULTOS MAYORES				VARONES ADULTOS			
	Intensidad	Desv. Est.	Aceptación	Desv. Est.	Intensidad	Desv. Est.	Aceptación	Desv. Est.
FLPCM	1.67	0.71	1.83	1.30	1.91	1.68	1.82	1.11
FLPCP	1.17	0.71	1.17	0.94	1.92	1.30	1.89	0.90
GLPCM	1.17	0.12	1.33	0.24	1.70	1.06	1.80	0.90
GLPCP	2.00	0.71	1.50	0.35	1.97	1.27	1.78	0.80
ARPCM	1.33	1.30	1.83	1.89	2.27	1.35	2.29	1.35
ARPCP	1.67	0.71	2.33	1.30	2.40	1.19	2.52	1.46

**Referencias:**

- Stevens, J. C., & Cain, W. S. (1987). Detecting Gas Odor in Old Age a. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 510(1), 644-646.
- Toledano, A., González, E., Onrubia, T., Herráiz, C., Mate, M. A., García, M., . . . Galindo, N. (2003). Test de olfato de Connecticut (CCRC): valores en voluntarios sanos. *Acta Otorrinolaringológica Española*, 54(10), 678-685.