

Área de Conocimiento de Agricultura

“EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE EL CONTENIDO DE HIDROCARBUROS DEL RANGO ORGÁNICO DE DIÉSEL EN SUELOS CONTAMINADOS”.

Trabajo Monográfico para optar al título de
Ingeniero Químico

Elaborado por:

Br. Adiac León Canales
Matute
Carnet: 2018-0947U

Br. Aarón David Navarro
Ulloa
Carnet: 2020-0832U

Tutor:

MSc. Wilfredo Varela
Fonseca



REF.DACA.FCE.107.2025
Managua, 26 de marzo del 2025

Bachilleres

ADIAAC LEÓN CANALES MATUTE / 2018-0947U
AARÓN DAVID NAVARRO ULLOA / 2020-0832U

Estimado Bachilleres:

Es de mi agrado informarles que el PROTOCOLO de su Tema **MONOGRAFICO**, titulado: **"EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE EL CONTENIDO DE HIDROCARBUROS DEL RANGO ORGÁNICO DE DIÉSEL EN SUELOS CONTAMINADOS"**. Ha sido aprobado por la Dirección de Área de Conocimiento de Agricultura.

Asimismo, les comunico estar totalmente de acuerdo, que el **MSc. Wilfredo Varela Fonseca** sea el tutor de su trabajo monográfico.

La fecha límite, para que presenten concluido su documento final, debidamente revisado por el tutor guía será el **26 de octubre del 2025**.

Esperando puntualidad en la entrega de la Monografía, me despido.

Atentamente,

MSc. José Mamerto Méndez Úbeda
Director de Área de Conocimiento de Agricultura
DACA

CC: Archivo

Tutor – **MSc. Wilfredo Varela Fonseca**

MSc. Helia Vanessa Taleno Oporta / secretaria Académica DACA

i. Opinión del catedrático guía

MSc. José Mamerto Méndez Úbeda

Director DACA

Estimados MSc. Ing. Méndez Úbeda:

Por este medio, me dirijo a ustedes para informar que, como profesor titular del programa académico de ingeniería química, he revisado el trabajo monográfico titulado **“Efecto de la temperatura sobre el contenido de hidrocarburos del rango orgánico de diésel en suelos contaminados”**, elaborado por los estudiantes **Br. Adiac León Canales Matute** y **Br. Aarón David Navarro Ulloa**.

Después de una revisión detallada, considero que el contenido del trabajo cumple con los criterios académicos y científicos requeridos para optar al título de Ingeniero Químico. La monografía presenta una investigación rigurosa sobre la influencia de la temperatura en la degradación de hidrocarburos, específicamente en la fracción C10–C28 (TPH-DRO), en suelos contaminados artificialmente, desarrollándose bajo un enfoque práctico y con el respaldo técnico de la División de Control Ambiental del Instituto Nicaragüense de Energía (INE).

En virtud de lo anterior, recomiendo formalmente la aprobación de este trabajo monográfico y su continuación hacia el proceso de evaluación y defensa correspondiente.

Reitero además mi disposición como tutor del presente estudio, reafirmando mi compromiso con el acompañamiento académico brindado a lo largo del desarrollo del mismo.

Agradezco su atención y quedo a la disposición para cualquier consulta adicional.

Atentamente,

MSc. Wilfredo Varela Fonseca
Profesor Titular del del programa académico
de Ingeniería Química.

ii. Dedicatoria

A mis padres, por ser el pilar más firme en mi vida. Por su amor, su ejemplo y por enseñarme que los sueños se construyen con esfuerzo, paciencia y valentía. Este logro les pertenece tanto como a mí.

A mi abuelo paterno, por ver en mí lo que aún estaba por construir. Su orgullo silencioso y su fe constante fueron una inspiración que me acompañó desde el inicio.

Y a mí yo pequeño, por soñar sin miedo, por confiar incluso en los días más difíciles y por no rendirse cuando el camino se volvía cuesta arriba. Hoy le cumplo esa promesa.

-Aarón Navarro

Dedicado a la vida, trabajo y memoria del Ing. Miguel Ángel Matute Hernández, mi abuelo, que desde el día que comulgó en la casa del padre, me ha inspirado para sembrar y cosechar los frutos de esta carrera, como él lo hizo en su loma de Macuelizo.

A mi Mamá y a mi Papá, leyendas de la Ingeniería Química en Nicaragua.

- **Adiac León**

iii. Agradecimientos

A Dios, fuente de fortaleza y esperanza en cada etapa de este camino. Gracias por sostenerme en los momentos de incertidumbre y por acompañarme, aun en silencio, cuando más lo necesité.

A mis padres, Mercedes y David, por ser el reflejo del amor incondicional, la constancia y la fe. Gracias por cada palabra de aliento, por cada sacrificio silencioso y por enseñarme, con el ejemplo, que los sueños se alcanzan con esfuerzo y humildad.

A mis tíos, Claritza y Daniel, y a su familia, por abrirme las puertas de su hogar con tanto cariño, por hacerme sentir parte de su familia desde el primer momento y por convertir una nueva etapa en una experiencia cálida y cercana. Su apoyo fue esencial para que este proceso se viviera con tranquilidad y gratitud.

A mi hermana mayor, por estar siempre presente, aun en la distancia. Gracias por tu apoyo constante, por tus palabras de ánimo y por recordarme que siempre tengo a alguien que cree en mí, sin importar la distancia que nos separe.

A los amigos que me regaló este trayecto, gracias por las conversaciones sinceras, por el apoyo mutuo, por las risas que aligeraron las cargas, y por caminar a mi lado en esta etapa tan significativa.

A mi compañero de tesis, Adiac Canales, por atreverse a emprender este reto a mi lado, aun sin conocerme. Gracias por tu compromiso, tu compañerismo y por permitirme culminar este proyecto junto a vos. Este trabajo no habría sido el mismo sin tu entrega y dedicación.

Finalmente, agradezco a mi yo de hace algunos años, que con valentía decidió salir de lo conocido y emprender un camino lleno de desafíos. Gracias por no rendirte, por confiar en el proceso y por avanzar siempre, aún con miedo. Hoy, esa apuesta valiente se convierte en una realidad.

-Aarón Navarro

A Dios Padre Todopoderoso, supremo arquitecto e ingeniero, que nos dio la bondad de la vida y el don de la sabiduría para el estudio de los misterios y fenómenos de la química con la cual creó al mundo.

A mis padres Mael y Elixon, por todo su amor y apoyo en mi vida y estudios, gracias a ellos soy quien soy y me motivan a convertirme en el profesional que quiero ser.

A María José, que me ha dado todo su amor, comprensión y ternura desde el inicio hasta el final de esta carrera; por todas las experiencias bonitas que hemos vivido en la UNI.

A mi hermana Mariangel que para mí es un gran ejemplo en la vida y a mis Abuelas, por la enseñanza de la unión de la familia y la superación de las barreras de cada día.

A la familia Obando Flores, que, con brazos abiertos, me han alentado, apoyado, y recibido en su familia, haciéndome sentir como un integrante más de su hogar.

Agradezco a mi amigo Aaron Ulloa, uno de los mejores compañeros con los que he compartido en esta carrera, de quien me siento muy orgulloso por todo el proceso que hemos recorrido juntos, y al Ing. Wilfredo Varela por su apoyo y disposición en la realización de este trabajo monográfico.

Al Instituto Nicaragüense de Energía, bajo la dirección del Lic. José Antonio Castañeda y los miembros del Consejo de Dirección, por el respaldo recibido para la culminación de estos estudios y la oportunidad de desarrollarme como profesional en el INE.

A mis compañeros de la División de Control Ambiental, liderada por el Lic. Bolívar Avilés, por su cálido recibimiento, sus enseñanzas y el conocimiento para el desarrollo de esta tesis. Además, agradezco la oportunidad de continuar el legado de mi abuelo en la regulación ambiental del sector energético.

-Adiac León

iv. Resumen

El presente trabajo monográfico tiene como objetivo analizar la influencia de la temperatura en la variación del contenido de hidrocarburos del rango orgánico de diésel (TPH-DRO) a través de indicadores fisicoquímicos en suelos contaminados artificialmente. Para el alcance de esto, se realizaron tareas de campo y laboratorio, destinadas a la caracterización de una muestra de suelo y observación de su evolución bajo temperaturas controladas durante 15 días, simulando condiciones ideales de almacenamiento.

Al material en estudio se le realizó la determinación de propiedades físicas como: la densidad aparente, granulometría en seco y textura. Además, se llevaron a cabo análisis fisicoquímicos en 20 muestras de suelo para evaluar los indicadores de hidrocarburos totales del petróleo (TPH), potencial de Hidrógeno (pH), conductividad eléctrica, carbono orgánico total (COT), oxígeno disuelto (OD), demanda química de oxígeno (DQO) y demanda biológica de oxígeno (DBO). Estas muestras fueron divididas en grupos, conservadas a rangos de temperatura inferiores o iguales a 0°C, 4°C y 15°C, y analizadas en los días 0, 7 y 15 después de su colecta y contaminación.

Las actividades se desarrollaron entre los meses de marzo a mayo de 2025 en los laboratorios de ingeniería de procesos, edafología e ingeniería ambiental, pertenecientes a la Dirección del Área de Conocimiento de Agricultura (DACA/UNI). Los resultados de la investigación se presentan en las tablas 13 a la 20, y se ilustran en las figuras 7 a la 13. El análisis de los datos concluyó que las concentraciones de TPH-DRO e indicadores fisicoquímicos relacionados con la presencia de hidrocarburos, varían en función de la temperatura debido a su influencia en la perturbación de las muestras de suelo contaminado. Se determinó que las temperaturas óptimas de conservación son aquellas que no superan los 4°C.

Tabla de contenido

i.	Opinión del catedrático guía.....	i
ii.	Dedicatoria.....	ii
iii.	Agradecimientos	iv
iv.	Resumen	vi
I.	Introducción	1
II.	Objetivos.....	3
2.1.	Objetivo General	3
2.2.	Objetivos Específicos	3
III.	Marco Teórico	4
3.1.	Contextualización de la problemática	4
3.2.	Definición de hidrocarburos	5
3.2.1.	Fracción media de hidrocarburos (TPH-DRO).....	5
3.3.	Contaminación por hidrocarburos.....	7
3.3.1.	Derrames de hidrocarburos	7
3.3.2.	Contaminación de suelo y subsuelo	8
3.3.3.	Procesos de investigación ambiental.....	12
3.3.4.	Lineamientos para el muestreo de suelo	15
IV.	Metodología	20
4.1.	Diseño Experimental	21
4.1.1.	Tipo de investigación.....	21
4.1.2.	Factores y niveles	21
4.1.3.	Tratamientos	21
4.1.4.	Variable respuesta.....	22
4.1.5.	Hipótesis	23
4.2.	Caracterización fisicoquímica de muestras de suelo contaminado con TPH-DRO.....	23
4.2.1.	Ubicación del muestreo y colecta de muestra	23
4.2.2.	Determinación de la densidad aparente (ρ_a) del suelo.....	23
4.2.3.	Tratamiento preliminar del suelo.....	24
4.2.4.	Determinación de la textura del suelo.....	24
4.2.5.	Establecimiento de la línea de base del suelo sin contaminar (análisis de indicadores en suelo limpio)	25
4.2.6.	Métodos analíticos para determinar indicadores fisicoquímicos	25
4.2.7.	Preparación de muestras contaminadas con diésel.....	27
4.2.8.	Establecimiento de la línea de base del suelo contaminado (análisis de indicadores en suelo contaminado)	28
4.3.	Tendencias y patrones del efecto de la temperatura y el tiempo de conservación sobre el TPH-DRO	29
4.3.1.	Colecta y preservación de muestras.....	29
4.3.2.	Determinación de las concentraciones de los indicadores a temperatura de 0°C, 4°C y 15°C	30
4.4.	Determinación de condiciones óptimas de conservación de muestras de suelo contaminado con TPH-DRO.....	31
V.	Presentación y discusión de resultados	32

5.1.	Caracterización fisicoquímica de muestras de suelo contaminado con TPH-DRO.....	32
5.1.1.	Determinación de la densidad aparente (ρ_a) del suelo.....	32
5.1.2.	Determinación de la textura del suelo.....	33
5.1.3.	Establecimiento de la línea de base del suelo sin contaminar (análisis de indicadores en suelo limpio)	34
5.1.4.	Establecimiento de la línea de base del suelo contaminado (análisis de indicadores en suelo contaminado)	34
5.2.	Tendencias y patrones del efecto de la temperatura y el tiempo de conservación sobre el TPH-DRO	36
5.2.1.	Preservación de las muestras	36
5.2.2.	Determinación de las concentraciones de los indicadores a temperaturas de 0°C ..	38
5.2.3.	Determinación de las concentraciones de los indicadores a temperaturas de 4°C ..	40
5.2.4.	Determinación de las concentraciones de los indicadores a temperaturas de 15°C ..	41
5.2.5.	Comportamiento de hidrocarburos totales del petróleo (TPH) ante la variación de temperatura y tiempo de conservación	42
5.2.6.	Comportamiento de potencial de hidrógeno (pH) ante la variación de temperatura y tiempo de conservación.....	45
5.2.7.	Comportamiento de conductividad eléctrica ante la variación de temperatura y tiempo de conservación.....	47
5.2.8.	Comportamiento del carbono orgánico total (COT) ante la variación de temperatura y tiempo de conservación	49
5.2.9.	Comportamiento de la demanda biológica de oxígeno (DBO) ante la variación de temperatura y tiempo de conservación	51
5.2.10.	Comportamiento de la demanda química de oxígeno (DQO) ante la variación de temperatura y tiempo de conservación	53
5.2.11.	Comportamiento del oxígeno disuelto (OD) ante la variación de temperatura y tiempo de conservación.....	55
5.3.	Determinación de condiciones óptimas de conservación de muestras de suelo contaminado con TPH-DRO.....	57
5.3.1.	Análisis de varianza de los resultados analíticos de TPH en relación con la variación de la temperatura y tiempo de conservación en muestras de suelo contaminado	57
VI.	Conclusiones	61
VII.	Recomendaciones	62
VIII.	Bibliografía	63
IX.	Anexos.....	66

Figuras

Figura 1 – Causas de contaminación originados por agentes económicos de la cadena de suministro de hidrocarburos	8
Figura 2 – distribución de los hidrocarburos tras un vertido.....	10
Figura 3 – Esquema general de las etapas de actuación en suelos contaminados	13
Figura 4 – Comportamiento de la temperatura con respecto al tiempo en frigorífico No.1.....	37
Figura 5 – Comportamiento de la temperatura con respecto al tiempo en frigorífico No.2.....	37
Figura 6 – Comportamiento de la temperatura con respecto al tiempo en frigorífico No.3.....	38
Figura 7 – Efecto del rango de temperatura en las concentraciones de hidrocarburos totales del petróleo (TPH)	43
Figura 8 – Efecto del rango de temperatura en los valores de pH.....	45
Figura 9 – Efecto del rango de temperatura en los valores de conductividad	48
Figura 10 – Efecto del rango de temperatura en las concentraciones de carbono orgánico total	50
Figura 11 – Efecto del rango de temperatura en las concentraciones de DBO	52
Figura 12 – Efecto del rango de temperatura en las concentraciones de DQO	53
Figura 13 – Efecto del rango de temperatura en las concentraciones de oxígeno disuelto (OD)	55
Figura 14 – Concentración promedio de TPH-DRO en función de la temperatura y tiempo de conservación.....	51

Tablas

Tabla 1 – Clasificación de hidrocarburos	5
Tabla 2 - Especificaciones de calidad para aceite combustible diésel	6
Tabla 3 - Hidrocarburos que deberán analizarse en función del producto contaminante	15
Tabla 4 - Límites máximos permisibles para fracciones de hidrocarburos en suelo	16
Tabla 5 - Recipientes para las muestras, temperaturas de preservación y tiempo máximo de conservación por tipo de parámetro.	17
Tabla 6 – Factores Independientes	21
Tabla 7 – Tratamientos Experimentales	22
Tabla 8- Factores Dependientes	22
Tabla 9 – Clasificación del tipo de suelo según su tamaño de partícula	24
Tabla 10 – Métodos de laboratorio para la determinación de concentraciones de indicadores fisicoquímicos	25
Tabla 11 – Distribución de las muestras de suelo contaminado en cada frigorífico.....	29
Tabla 12 – Parámetros a controlar, frecuencia de revisión y fecha de muestreo.	30
Tabla 13 – Clasificación del suelo según su textura mediante análisis granulométrico.....	33
Tabla 14 – Concentraciones de indicadores fisicoquímicos en línea de base de la muestra de suelo no contaminada.....	34
Tabla 15 – Concentraciones de indicadores fisicoquímicos en línea de base de la muestra de suelo contaminado (día 0).....	35
Tabla 16 – Registro de temperatura por cada frigorífico	36
Tabla 17 – Comportamiento estadístico de la temperatura.....	37
Tabla 18 - Concentraciones de indicadores fisicoquímicos de las muestras conservadas en frigorífico No.1 y analizada al 7mo y 15vo día de conservación	39
Tabla 19 - Concentraciones de indicadores fisicoquímicos de las muestras conservadas en frigorífico No.2, analizada al 7mo y 15vo día de conservación	41
Tabla 20 - Concentraciones de indicadores fisicoquímicos de las muestras conservadas en frigorífico No.3, analizada al 7mo y 15vo día de conservación	42
Tabla 21 – Comportamiento de los resultados analíticos de TPH ante la variación de temperatura de conservación en muestras de suelo contaminado.....	43
Tabla 22 – Comportamiento de los resultados analíticos de ph ante la variación de temperatura de conservación en muestras de suelo contaminado.....	45
Tabla 23 – Comportamiento de los resultados analíticos de conductividad eléctrica ante la variación de temperatura de conservación en muestras de suelo contaminado	48

Tablas

Tabla 24 – Comportamiento de los resultados analíticos de COT ante la variación de temperatura de conservación en muestras de suelo contaminado	50
Tabla 25 – Comportamiento de los resultados analíticos de DBO ante la variación de temperatura de conservación en muestras de suelo contaminado	52
Tabla 26 – Comportamiento de los resultados analíticos de DQO ante la variación de temperatura de conservación en muestras de suelo contaminado	53
Tabla 27 – Comportamiento de los resultados analíticos de oxígeno disuelto (OD) ante la variación de temperatura de conservación en muestras de suelo contaminado	55
Tabla 28- Distribución de los factores para tratamiento estadístico de los resultados de TPH...	57
Tabla 29 – Análisis descriptivo de las estadísticas relacionadas con los factores evaluados	58
Tabla 30 – Resultados del análisis de varianza (ANOVA) de las concentraciones de TPH obtenidas	59

Anexos

Anexo 1. Materiales a utilizar en la experimentación.....	66
Anexo 2. Ubicación y colecta de muestra de suelo	69
Anexo 3. Determinación de la densidad aparente	69
Anexo 4. Preparación de muestras contaminadas por diésel	69
Anexo 5. Determinación de la textura del suelo	70
Anexo 6. Muestras de 0°C, 4°C y 15°C previo al análisis.....	70
Anexo 7. Análisis de TPH.....	71
Anexo 8. Análisis de pH y conductividad	71
Anexo 9. Análisis de COT	71
Anexo 10. Análisis de DBO, DQO y OD	72
Anexo 11. Experimentación.....	72

I. Introducción

A partir de la década de 1960, con la instalación de la primera y única refinería para el procesamiento de crudo en Nicaragua, se han ampliado las actividades de operación y desarrollo en los sectores que demandan el uso de hidrocarburos para la generación de energía. Esto ha contribuido a la diversificación industrial, acceso a nuevas tecnologías, expansión del sector transporte y abastecimiento de combustible en el país. Desde el inicio del siglo XXI, el estado nicaragüense ha implementado un sistema de atención y seguimiento dirigido a los Agentes Económicos en la cadena de suministro de hidrocarburos, con la finalidad de mitigar accidentes, interrupciones en el suministro y contaminación ambiental (Ministerio de Energía y Minas, 2023).

Para el año 2024, el Instituto Nicaragüense de Energía registró 506 instalaciones legalizadas para el depósito y almacenamiento de combustibles líquidos, clasificadas en refinería, oleoductos, planteles de almacenamiento y transporte, clientes industriales y estaciones de servicio (INE, 2024). A estas instalaciones se les realizan evaluaciones técnicas y ambientales de carácter preventivo para su regulación.

Asimismo, en los casos en que se detectan indicios de contaminación en suelo y/o agua, se implementan procesos de caracterización más exhaustivos, que resultan en actividades correctivas de remediación ambiental. No obstante, actualmente Nicaragua no dispone de una normativa nacional que establezca los límites mínimos y máximos permisibles para el contenido de hidrocarburos en suelo y agua; por lo tanto, el país ha optado por la referenciación de normativas de países con condiciones hidrológicas y geológicas similares, como lo es la Norma Oficial Mexicana **NOM-138-SEMARNAT/SS-2003**.

Estos procesos correctivos permiten la delimitación de las plumas de contaminación ambiental, las cuales se manejan mediante propuestas de remediación sujetas a aprobación y estudio en las matrices afectadas. Para la caracterización de sitios contaminados y evaluación de la efectividad de los métodos de remediación, se llevan a cabo muestreos confirmatorios en los que generalmente se recolectan de 10 a más muestras para ser enviadas y analizadas tanto en laboratorios nacionales como internacionales debidamente certificados. Las actividades de muestreo se efectúan en puntos estratégicos (aleatorios o dirigidos) de la pluma de contaminación según la naturaleza de cada caso (SEMARNAT, 2004).

El incumplimiento de los rangos de temperatura y tiempo de conservación en las muestras colectadas para la caracterización de agua y suelos contaminados por hidrocarburos representa una debilidad en la evaluación técnica realizada por las autoridades reguladoras para cada caso. Esta situación compromete la validez de los análisis y afecta la toma de decisiones para la gestión y remediación de los sitios contaminados.

Por esta razón, a solicitud del Instituto Nicaragüense de Energía, a través de la División de Control Ambiental (**DCA/INE**), se elaboró la presente monografía con el objetivo de demostrar y analizar la influencia de la temperatura en la variación del contenido de TPH-DRO bajo condiciones ideales de almacenamiento. El estudio busca contribuir a las autoridades a: **1)** La comprensión del comportamiento del contaminante ante las condiciones de almacenamiento, **2)** La reducción del rechazo de muestras por el incumplimiento del control de calidad y **3)** El Establecimiento de una línea de base científica para el desarrollo de normativas nacionales sobre el manejo de sitios contaminados por hidrocarburos y la preservación de sus muestras.

II. Objetivos

2.1. Objetivo General

Analizar la influencia de la temperatura sobre el contenido de hidrocarburos del rango orgánico de diésel (TPH-DRO) a través de indicadores fisicoquímicos en muestras de suelos contaminados artificialmente.

2.2. Objetivos Específicos

1. Determinar la concentración de los parámetros fisicoquímicos utilizados como indicadores de calidad en muestras de suelo con presencia de hidrocarburos del rango orgánico de diésel (TPH-DRO).
2. Identificar tendencias y patrones que reflejen el efecto de la temperatura sobre el comportamiento del rango orgánico de diésel (TPH-DRO) y los indicadores fisicoquímicos analizados.
3. Establecer las condiciones óptimas de conservación de muestras de suelo contaminado con TPH-DRO, con el fin de minimizar la perturbación de los indicadores fisicoquímicos durante el tiempo de almacenamiento.

III. Marco Teórico

3.1. Contextualización de la problemática

Según las estadísticas del Ministerio de Energía y Minas (MEM, 2023) de Nicaragua, en 2022 el país registró un consumo nacional de derivados del petróleo equivalente a 12,721,000 barriles. Esta cantidad se distribuye entre los distintos tipos de combustibles utilizados para la generación de energía en instalaciones industriales, así como en el sector residencial y de transporte. Igualmente, Para el año 2024 el Instituto Nicaragüense de Energía (INE) registró 506 instalaciones legalizadas para el depósito y almacenamiento de combustibles líquidos, clasificadas en refinería, oleoductos, planteles de almacenamiento y transporte, clientes industriales y estaciones de servicio, todos denominados como Agentes Económicos (INE, 2024).

El INE, como organismo regulador del subsector de hidrocarburos en el país, junto con las autoridades competentes, supervisa los casos de contaminación ambiental presentes en los sitios de los Agentes Económicos de acuerdo con lo establecido en el artículo 45 de la Ley No. 277, "Ley de Suministro de Hidrocarburos" de Nicaragua. En estos casos, se realiza un seguimiento continuo hasta garantizar la descontaminación de suelos y aguas, aplicando tratamientos ex situ e in situ. Esto incluye la supervisión y fiscalización de las actividades de remediación, así como el muestreo de suelo y agua, que se envían a un laboratorio para su análisis. A partir de los resultados obtenidos, se determina el grado de contaminación existente.

Todos los casos de contaminación son analizados y evaluados de acuerdo con los lineamientos establecidos en la norma de referencia **NOM-138-SEMARNAT/SS-2003, que define los "Límites Máximos Permisibles de Hidrocarburos en Suelos y las especificaciones para su caracterización y remediación"**. Esta norma establece los procedimientos y las buenas prácticas para el manejo y muestreo de suelos contaminados y son aplicadas a las compañías y empresas consultoras responsables de llevar a cabo estas actividades en los sitios de los Agentes Económicos.

No obstante, el incumplimiento de los controles de calidad como lo son los rangos de temperatura y tiempo de conservación en las muestras colectadas para la caracterización de agua y suelos contaminados por hidrocarburos representa una debilidad en la evaluación técnica realizada por las autoridades reguladoras para cada caso. Esta situación compromete la validez de los análisis y afecta la toma de decisiones para la gestión y remediación de los sitios contaminados.

3.2. Definición de hidrocarburos

La ley No. 277 "Ley de Suministro de Hidrocarburos" de Nicaragua, define los hidrocarburos como "compuestos químicos que consisten principalmente de carbono e hidrógeno, en cualquier estado físico" (Ley de suministro de hidrocarburos, 1997). Estos compuestos carbonados se encuentran generalmente en forma de mezcla en el petróleo crudo, que, a través del proceso de refinación, se obtienen numerosos compuestos que se utilizan como combustibles, solventes y materia prima para la industria petroquímica. La **Tabla 1** presenta la clasificación de hidrocarburos de acuerdo con la norma oficial mexicana **NOM-138-SEMARNAT/SS-2003**. (Norma utilizada como referencia en la evaluación de casos de contaminación por hidrocarburos en Nicaragua).

Tabla 1

Clasificación de hidrocarburos

No	Clasificación	Definición
1	Hidrocarburos Fracción Ligera	Mezcla de hidrocarburos cuyas moléculas contengan entre cinco y diez átomos de carbono (C5 a C10)
2	Hidrocarburos Fracción Media	Mezcla de hidrocarburos cuyas moléculas contengan entre diez y veintiocho átomos de carbono (C10 a C28)
3	Hidrocarburos Fracción Pesada	Mezcla de hidrocarburos cuyas moléculas contengan entre veintiocho y cuarenta átomos de carbono (C28 a C40).

Nota: SEMARNAT (2004).

3.2.1. Fracción media de hidrocarburos (TPH-DRO)

Los Hidrocarburos Totales de Petróleo (TPH) son un término genérico que engloba una amplia gama de compuestos químicos derivados del petróleo crudo. El Rango Orgánico de Diésel (DRO) se conforma por una mezcla compleja de distintos tipos de hidrocarburos (parafinicos, nafténicos, oleofinicos, aromáticos y polis aromáticos), cuyo rango de destilación (ebullición) varía entre 80 °C y 400 °C.

Características fisicoquímicas del TPH-DRO (C10 – C28)

Según lo presentado en la **Tabla 2**, El Reglamento Técnico Centroamericano RTCA 75.02.17:06, “Productos de Petróleo. Aceite Combustible Diésel. Especificaciones”, presenta las características que debe cumplir el Diésel para uso automotriz y termoeléctrico en los Estados parte de la Unión Aduanera Centroamericana.

Tabla 2

Especificaciones de calidad para aceite combustible diésel

No.	Característica	Unidades	Método ASTM	Valores
1	Apariencia	-	D-4176	Claro y Brillante
2	Aditivos	-	-	Reportar
3	Color ASTM	-	D-1500	Reportar
4	Índice de Cetano Calculado	-	D-976	45 mínimo
5	Número de Cetano	-	D-613	45 mínimo
6	Corrosión tira de cobre, 3 h, 50 °C.	-	D-130	No. 2 máximo
7	Contenido de Cenizas	Fracción de masa (%masa)	D-482	0.01 máximo
8	Contenido de azufre total	Fracción de masa (%masa)	D-129	0.50 máximo
9	Residuo de Carbón Conradson en 10% Residuo	Fracción de masa (%masa)	D-189	0.10 máximo
	ó Residuo de Carbón en Ramsbottom en 10% de Residuo		D-524	0.13 máximo
10	Agua y Sedimentos	Fracción de Volumen (%volumen)	D-2709	0.05 máximo
11	Punto de inflamación (Flash Point)	°C	D-93	52 mínimo

No	Característica	Unidades	Método ASTM	Valores
12	Gravedad API a 15.56°C (60°F) o densidad a 15°C	°API (kg/m ³)	D-287 D-1298	Reportar
13	Punto de Ecurrimiento	°C	D-97	Reportar
14	Punto de Enturbiamiento	°C	D-2500	10 máximo
15	Viscosidad Cinemática a 40°C	mm ² /s	D-445	1.9 – 4.1
16	Destilación:			Reportar
	10% recuperados	°C		Reportar
	50% recuperados	°C	D-84	360 máximo
	90% recuperados	°C		Reportar
	Punto final de ebullición	°C		Reportar
17	Aromáticos	Fracción de Volumen (% volumen)	D-1319	Reportar

Nota: Centroamericano, R. T (2006).

3.3. Contaminación por hidrocarburos

La contaminación por hidrocarburos se refiere a la presencia y acumulación de compuestos orgánicos derivados del petróleo y el gas natural en el medio ambiente. Esta contaminación surge principalmente de actividades como la extracción, refinación, transporte y uso de combustibles fósiles, así como de derrames accidentales o vertidos ilegales. Los hidrocarburos contaminan el agua, el suelo y el aire, afectando a los ecosistemas, la vida silvestre y la salud humana, y llegan a tener persistencia en el medio ambiente por su toxicidad y bioacumulación. (Rodríguez, 2008)

3.3.1. Derrames de hidrocarburos

Los derrames de hidrocarburos hacen referencia a la liberación intencional o accidental de petróleo, gas natural o sus derivados al medio ambiente. Estos eventos pueden ocurrir en diversos contextos, como:

- **Derrames Marinos:** Liberaciones de petróleo en costas y océanos, generalmente causadas por accidentes en plataformas petroleras, naufragios de barcos o fugas en tuberías submarinas.

- **Derrames Terrestres:** Liberaciones de hidrocarburos durante el transporte, en instalaciones de almacenamiento o por accidentes con camiones cisterna.

Los derrames de hidrocarburos tienen un impacto directo en el medio ambiente, contaminando el suelo, el agua y el aire. Además, pueden generar sanciones legales y daños económicos considerables.

Causas

La **Figura 1** presenta un panorama general de las causas más comunes de derrames de hidrocarburos, tanto en instalaciones fijas como durante su transporte, destacando las principales áreas de riesgo.

Figura 1

Causas de contaminación originados por agentes económicos de la cadena de suministro de hidrocarburos



Nota: Rodríguez, J.M.S (2008).

3.3.2. Contaminación de suelo y subsuelo

El comportamiento de los hidrocarburos en el suelo depende de las características del contaminante, las condiciones ambientales y las propiedades del medio. Según Ritoré (2021), cuando se produce un derrame de gasolina o diésel en un suelo, los hidrocarburos pueden percolar hasta el subsuelo y distribuirse en tres fases: acuosa, gaseosa y NAPL (líquidos no acuosos). Estas fases están sujetas a procesos de transferencia de masa como la adsorción, migración a diferentes estratos y degradación por factores fisicoquímicos del medio.

Textura del suelo

La textura del suelo se refiere a la proporción de las diferentes partículas que lo componen, principalmente arena, limo y arcilla, y se clasifica según el tamaño de estas partículas. Un estudio realizado por la Universidad Autónoma de Chapingo, México (Lerena Villalpando, 2023), destaca que la textura del suelo influye en sus propiedades físicas y químicas, así como en la relación entre humedad y sólidos. Estas características son fundamentales para entender el comportamiento del suelo frente a derrames y la contaminación por hidrocarburos.

Principales propiedades físicas del suelo definidas por la textura.

- a. **Porosidad:** Entre mayor sea el contenido de arcillas en un suelo, son mayores los espacios de vacío y, por lo tanto, el valor del porcentaje de porosidad en relación con el volumen total del suelo igual aumenta.
- b. **Tipos de poros presentes:** En suelos con mayor contenido de arcilla, predominan los microporos (los encargados de retener el agua), con relación a los macro poros (que es donde fluye el agua y el aire).
- c. **Densidad aparente (ρ_a):** Esta propiedad depende del peso de todas las partículas sólidas que estén contenidas en un volumen total de suelo, por lo que entre mayor sea el contenido de arcillas, mayor porosidad y menor peso, por lo tanto, menor ρ_a .
- d. **Superficie específica:** Esta propiedad se relaciona con la retención de humedad del suelo, debido a que la superficie específica funciona como área de contacto en donde se manifiesta la propiedad de adhesión de las moléculas de agua. A mayor contenido de arcillas, mayor área específica y mayor retención de humedad.

Principales propiedades químicas del suelo definidas por la textura.

- a. **Capacidad de intercambio de cationes:** La gran mayoría de las arcillas existentes en un suelo presentan cargas negativas libres originadas por diferentes causas, las cuales, de manera natural, se equilibran y contrarrestan con cationes provenientes de la solución del suelo, que pasan de ser solubles a intercambiables adsorbidos y viceversa, no pudiendo un catión ocupar las dos posiciones al mismo tiempo.

Relación agua-suelo definidas por la textura.

- a. **Capacidad de retención de humedad:** Es la cantidad de líquidos que puede almacenar o retener en los microporos de un suelo en contra de la fuerza de gravedad, lo que sucede debido a la atracción que existe entre las moléculas del líquido y del suelo conocidas como fuerzas de tensión de humedad.
- b. **Constantes de humedad:** Las tres constantes expresadas en valores de contenido de humedad son la Saturación (S), Capacidad de Campo (CC) y Punto de Marchitamiento Permanente (PMP).
- c. **Principales tipos de movimiento del agua en el suelo:** La textura combinada con la estructura del suelo, definen la cantidad y tipo de espacios vacíos que contiene, los que a su vez definen la cantidad que puede retener y determina la facilidad que tiene el agua y los líquidos presentes en el medio para que se muevan o circulen a través del suelo.

Migración y movimiento de hidrocarburos en el suelo

“El transporte de los hidrocarburos en el suelo se produce mediante mecanismos complejos, porque el suelo es un medio muy heterogéneo que tiene diferentes tipos y distribuciones de superficies sólidas” (Ritoré, 2021). La extensión y profundidad de la contaminación dependen del tipo de suelo, su porosidad, permeabilidad y la profundidad del agua subterránea. Esto genera diversos escenarios: desde una migración extensa y profunda del contaminante hasta su contención en un área limitada con poco volumen de material contaminado.

La **Figura 2** representa la distribución de los hidrocarburos en el suelo, subsuelo y nivel freático tras un derrame.

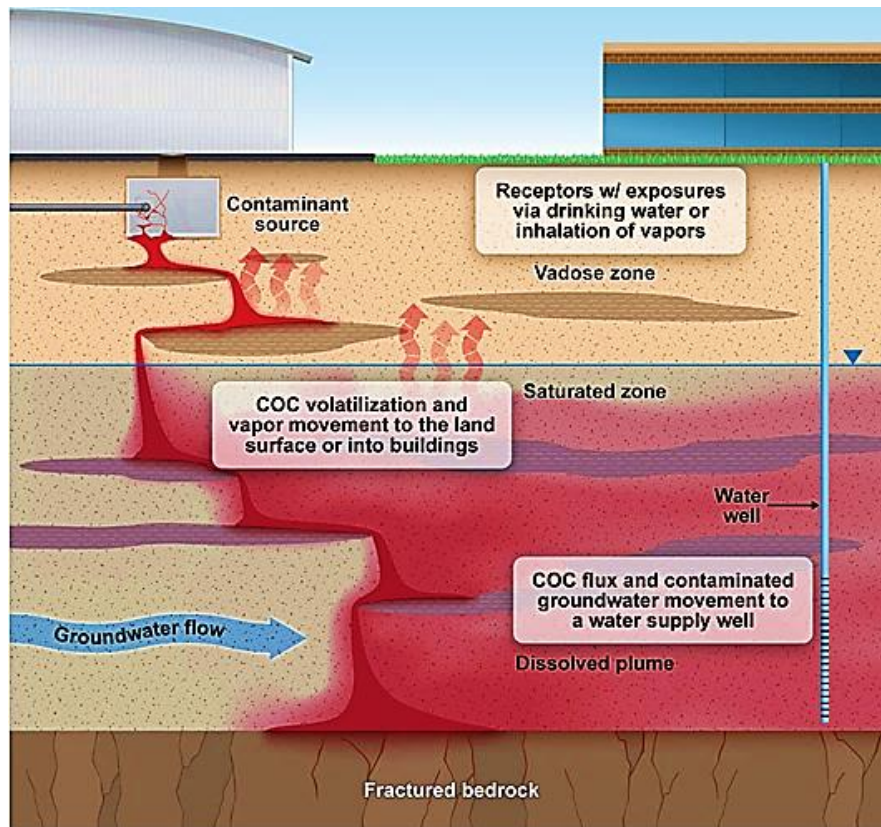
Retención de los contaminantes.

Los hidrocarburos al entrar en contacto con el suelo son retenidos por diversos procesos, en los que participan tres tipos de fuerzas (Ritoré, 2021):

1. Las fuerzas capilares: Resultado de la interacción de las fuerzas cohesivas de las moléculas de los fluidos y las adhesivas que experimentan los fluidos sobre los sólidos.
2. Las fuerzas de viscosidad: Las cuales son proporcionales a la permeabilidad y el gradiente de presión.
3. La Flotabilidad: Fuerza gravitacional que depende de la diferencia de densidades entre los fluidos.

Figura 2

Distribución de los hidrocarburos tras un vertido



Nota: Siegrist et al., (2011).

Degradación.

Cuando los contaminantes se concentran en el suelo, se pueden activar mecanismos naturales que reducen las concentraciones y el volumen de suelo contaminado.

Se define a la atenuación natural o biorremediación como:

La transformación de los hidrocarburos en sustancias inocuas por acción de parte de microorganismos, hongos y plantas existentes y nativas del medio, también este proceso ocurre por influencia de las propiedades fisicoquímicas como la volatilización y oxidación de los compuestos orgánicos contaminantes (Ritoré, 2021)

Efectos.

Todos los hidrocarburos derivados del petróleo son, en mayor o menor medida, tóxicos. Se califica como tóxica, a aquella sustancia con capacidad para provocar efectos nocivos sobre los seres vivos. Los efectos que un producto tóxico provoca, en concreto los hidrocarburos, depende de factores como: sensibilidad del ser vivo a ese contaminante, frecuencia, tiempo de exposición, cantidad y composición del hidrocarburo. (Ritoré, 2021)

Exposición al ser humano.

Los seres humanos pueden estar expuestos a los hidrocarburos del petróleo y a sus componentes más peligrosos (BTEX y HAP's) de muchas maneras, como se ha comentado anteriormente son sustancias relativamente comunes en la sociedad. Aunque las mayores exposiciones se producen cuando se respira aire en gasolineras, al usar productos químicos en el hogar o en el trabajo, mientras se trabaja con productos derivados del petróleo y si se vive cerca de una zona contaminada o se bebe agua contaminada. (Ritoré, 2021)

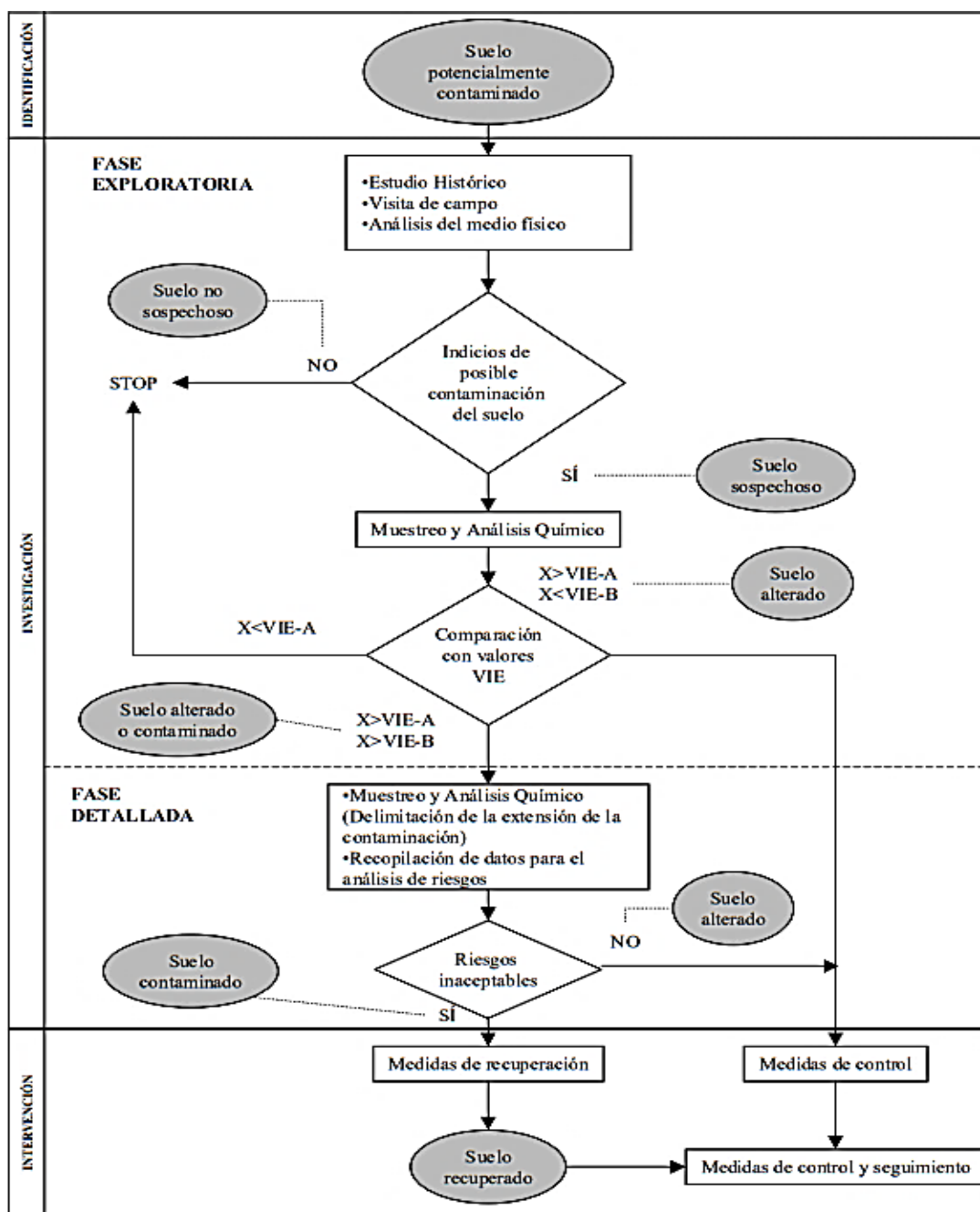
3.3.3. Procesos de investigación ambiental

Una vez identificada una fuente potencial de contaminación en suelo o agua, se procede a realizar una investigación detallada para determinar la naturaleza y la concentración de los contaminantes presentes. Este proceso, conocido como Caracterización Ambiental, busca identificar el tipo de material contaminante, su concentración y las posibles consecuencias para el medio ambiente.

Un elemento clave de este proceso es la caracterización de la contaminación del suelo, para lo cual se requiere, en aras de la optimización del resultado, de un diseño de muestreo específico y adecuado al caso en estudio, fijando para cada etapa de la investigación un objetivo concreto. (IHOBE, 2002). Con base en esta información, se pueden desarrollar métodos para el manejo, tratamiento y saneamiento de los recursos naturales afectados. La **Figura 3** presenta un flujograma que ilustra las etapas del desarrollo de planes de investigación ambiental, incluyendo el análisis de contaminación.

Figura 3

Esquema general de las etapas de actuación en suelos contaminados



Nota: IHOBE (2002).

Investigación Ambiental

La investigación de la contaminación en suelo o agua suele dividirse en dos etapas:

- **Investigación Exploratoria:**

Esta etapa inicial busca obtener una visión general de la situación, incluyendo la identificación preliminar de los contaminantes y la evaluación de su posible impacto. Según El Manual Práctico para la Investigación de la Contaminación del Suelo (2002), para el desarrollo del proceso de investigación exploratorio se debe realizar:

En primer lugar, se encuentran los trabajos dirigidos a confirmar o desechar los indicios de una posible contaminación en el suelo en el emplazamiento. En esencia, dichos trabajos comprenden la obtención de datos históricos sobre las actividades desarrolladas en el sitio, así como de datos sobre las características relevantes del medio físico en el que se ubica aquél. La obtención de la información antes señalada requiere además una visita al emplazamiento. Como resultado de estas tareas se debe elaborar un modelo conceptual inicial de la problemática del emplazamiento que incluya, entre otras cuestiones, una hipótesis preliminar acerca de los posibles contaminantes presentes y su distribución espacial (IHOBE, 2002).

- **Investigación Detallada:**

En esta etapa se llevan a cabo análisis más específicos para confirmar la presencia de los contaminantes, determinar su concentración exacta y evaluar extensión e impacto en el medio ambiente.

El objetivo de la Investigación Detallada es recabar información suficiente para realizar la evaluación de los riesgos actuales y futuros derivados de la contaminación detectada en el emplazamiento. Algunos de los aspectos esenciales a este respecto son la caracterización espacial (horizontal y vertical) y temporal de la contaminación, y evaluación de las posibilidades de migración de la misma dentro y fuera del emplazamiento (IHOBE, 2002).

3.3.4. Lineamientos para el muestreo de suelo

Límites máximos permisibles

En las **Tablas 3 y 4** se presentan las pruebas de laboratorio que se realizan en función del hidrocarburo específico de interés, así como los Límites Máximos Permisibles para cada tipo de hidrocarburo de acuerdo con la Norma de Referencia empleada. Esto permite evaluar el grado de contaminación de los suelos por hidrocarburos y definir los requerimientos para su remediación.

Tabla 3

Hidrocarburos que deberán analizarse en función del producto contaminante

No	Producto Contaminante	Análisis de Hidrocarburos				
		Fracción Pesada	Fracción Media	HAP's	Fracción Ligera	BTEX
1	Mezclas	x	x	x	x	x
2	Petróleo Crudo	x	x	x	x	x
3	Combustóleo	x		x		
4	Parafinas	x		x		
5	Petrolatos	x		x		
6	Aceites	x		x		
7	Gasóleos		x	x		
8	Diésel		x	x		
9	Turbosina		x	x		
10	Keroseno		x	x		
11	Creosota		x	x		
12	Gasavión				x	x
13	Gasolventes				x	x
14	Gasolinas				x	x
15	Gasnafta				x	x

Nota: SEMARNAT (2004).

Tabla 4

Límites máximos permisibles para fracciones de hidrocarburos en suelo

Fracción de Hidrocarburos	Uso de Suelo Predominante (mg/kg base seca)		
	Agrícola	Residencial	Industrial
Ligera	200	200	500
Media	1200	1200	5000
Pesada	3000	3000	6000

Nota: SEMARNAT (2004).

Estrategia de muestreo

Para el desarrollo del plan de caracterización del sitio contaminado, según la Norma de Referencia **NOM-138-SEMARNAT/SS-2003** “se podrá aplicar una estrategia de muestreo por métodos dirigidos o estadísticas, siempre y cuando los resultados permitan delimitar la distribución horizontal y vertical de los contaminantes en el suelo, de conformidad con los límites establecidos en las tablas 2 y 3 de la presente Norma” (SEMARNAT, 2004)

Tipos de recipientes, temperatura y tiempo de conservación

La **Tabla 5** proporciona una guía completa para la gestión de muestras, detallando los recipientes adecuados, las temperaturas de preservación y los tiempos máximos de conservación para cada tipo de parámetro. Esta información es crucial para garantizar la integridad y la validez de las muestras, evitando la degradación o la contaminación que podría afectar los resultados de los análisis.

Tabla 5

Recipientes para las muestras, temperaturas de preservación y tiempo máximo de conservación por tipo de parámetro.

Parámetro	Tipo de recipiente	Temperatura de preservación	Tiempo máximo de conservación
BTEX			7 días
Hidrocarburos Fracción Ligera	Frasco de vidrio boca ancha, con tapa y sello de teflón (Cartucho con sello que asegure la representatividad de las muestras hasta su análisis)	4°C	14 días
Hidrocarburos Fracción Media			
Hidrocarburos Fracción Pesada			
HAP's			

Nota: SEMARNAT (2004).

Efecto de la temperatura

La temperatura es un factor clave que influye en el comportamiento de los contaminantes, ya que es dominante de las variables físicas y químicas del medio, y de las condiciones ambientales en los que se encuentra el contaminante. Esta influencia puede afectar la estabilidad de los experimentos, la integridad y el análisis de las muestras en laboratorios, impactando los siguientes parámetros:

- **Velocidad de reacción:** “La velocidad de las reacciones químicas aumenta con la temperatura. al elevar la temperatura, aumenta el número de choques eficaces entre las moléculas, ya que, al incrementar su energía, muchas de ellas adquieren una energía superior a la de activación” (López, 2019). Esto genera y acelera reacciones paralelas que afectan la integridad de las muestras.

- **Crecimiento microbiano:** A medida que se incrementa la temperatura, la velocidad específica de crecimiento microbiano aumenta, lo que favorece la difusión y el transporte de nutrientes. Sin embargo, a temperaturas elevadas, la muerte celular puede ocurrir debido a la disrupción de la membrana plasmática, inactivación de enzimas y desnaturalización de proteínas (Castañeda, 2019).
- **Presión de vapor:** Los compuestos orgánicos suelen tener un bajo valor de presión de vapor. Por lo tanto, cuando la temperatura aumenta, estos compuestos tienden a pasar rápidamente de la fase líquida a la fase gaseosa, llevando a cabo un proceso de difusión gaseosa (Calderón Gómez, 2006).

Condiciones de seguridad para las muestras

- a) Cada muestra deberá ser sellada y etiquetada inmediatamente después de ser tomada y debe ser entregada para su análisis a un laboratorio de pruebas acreditado.
- b) No se deben analizar muestras cuyos sellos han sido violados
- c) Todos los sellos deben contar con la siguiente información como mínimo:
 - Nombre de la persona que tomó la muestra
 - Fecha y hora de muestreo
 - Nombre de la empresa
 - Lugar del muestreo
 - Número o clave única misma que la del sello

Indicadores fisicoquímicos en suelo

Según un ensayo elaborado por el grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropiable A.C., se define a un indicador fisicoquímico en el suelo como:

Un indicador de calidad de suelos se concibe como una herramienta de medición que debe dar información sobre las propiedades, procesos y características. Los indicadores se miden para dar seguimiento a los efectos del manejo sobre el funcionamiento del suelo en un período dado. Ellos pueden ser variables cualitativas o cuantitativas o índices compuestos por la relación entre diferentes variables. En general, los indicadores hacen referencia a las características o propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos. Las propiedades biológicas, como los indicadores ecológicos, son más dinámicas y, por lo tanto, tienen la ventaja de servir como señales tempranas de degradación o de mejoría de los suelos. (Astier-Calderón, 2002)

- **Conductividad eléctrica:** En soluciones acuosas la conductividad es directamente proporcional a la concentración de sólidos disueltos, por lo tanto, cuanto mayor sea dicha concentración, mayor será la conductividad. No obstante, los compuestos orgánicos tienden a ser aislantes y no conductores de la corriente eléctrica. (INSTRUMENTS, s.f.)
- **pH:** es una medida que sirve para establecer el nivel de acidez o alcalinidad de una disolución. “En suelos con presencias de hidrocarburos, el pH disminuye debido a la acumulación del carbono orgánico y a la generación de ácidos orgánicos.” (Calderón Gómez, 2006)
- **Hidrocarburos totales de petróleo (TPH):** La determinación de los TPH, es usada para la evaluación de sitios contaminados por hidrocarburos. El uso de concentraciones máximas de TPH para establecer los niveles de limpieza de muestras de suelo o agua contaminados con hidrocarburos es un enfoque común implementado por autoridades reglamentarias. (INTERTEK, s.f)
- **Carbono orgánico total (COT):** Se utiliza como un indicador no específico que informa al usuario sobre la cantidad total de carbono orgánico presente en la muestra.” En el suelo, la presencia de hidrocarburos provoca un aumento en el carbono orgánico, dado que el 75% del carbono del petróleo es oxidable.” (Calderón Gómez, 2006)
- **Demanda química de oxígeno (DQO):** “Se utiliza para medir el oxígeno equivalente a la materia orgánica oxidable mediante un agente químico oxidante” (Lecca, 2014)
- **Demanda bioquímica de oxígeno (DBO):** “La Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) se usa como una medida de la cantidad de oxígeno requerido para oxidación de la materia orgánica biodegradable, presente en una disolución, como resultado de la acción de oxidación aerobia.” (Lecca, 2014)
- **Oxígeno disuelto (OD):** Los niveles de oxígeno disuelto (OD) en las aguas naturales y residuales dependen de las actividades físicas, químicas y bioquímicas de un cuerpo de agua. El análisis de OD es una prueba clave en el control de la contaminación del agua y el proceso de tratamiento de residuos (Rice, 2012). Es un parámetro dependiente de la temperatura, ya que, al aumentar esta, la solubilidad del oxígeno en el agua disminuye.

IV. Metodología

La metodología del presente estudio monográfico se diseñó para evaluar la influencia de la temperatura de conservación y el tiempo de residencia sobre el contenido de hidrocarburos del rango orgánico de diésel (TPH-DRO) en suelos contaminados artificialmente, así como su efecto sobre indicadores fisicoquímicos representativos del estado del suelo. Para ello, se siguieron los procedimientos establecidos en la Norma Oficial Mexicana **NOM-138-SEMARNAT/SS-2003, “Límites Máximos Permisibles de Hidrocarburos en Suelos y las Especificaciones para su Caracterización y Remediación”**.

En la primera etapa, se recolectó, preparó y caracterizó la muestra de suelo, estableciendo la línea de base en condiciones limpias y contaminadas mediante la determinación de siete indicadores fisicoquímicos (primer objetivo específico).

En la segunda etapa, la muestra contaminada fue sometida a tres temperaturas controladas (0 °C, 4 °C y 15 °C) y a dos tiempos de residencia (7 y 15 días). Posteriormente, se elaboraron gráficos de barras para comparar los resultados y visualizar tendencias y patrones de variación asociados a las condiciones de conservación (segundo objetivo específico).

Finalmente, en la tercera etapa se aplicó un análisis estadístico ANOVA de dos vías con replicación, con el propósito de identificar la significancia de los efectos de la temperatura y del tiempo sobre las variables de respuesta, y así establecer las condiciones de conservación que minimizan la perturbación de los indicadores fisicoquímicos durante el almacenamiento (tercer objetivo específico).

Los análisis experimentales se llevaron a cabo en los laboratorios de Ingeniería Ambiental, Ingeniería de Procesos y Edafología de la DACA/UNI, contando con equipos e infraestructura especializada para el desarrollo de los ensayos.

4.1. Diseño Experimental

4.1.1. Tipo de investigación

El trabajo de investigación tiene un enfoque cuantitativo, predominando las estrategias de muestreo y análisis de datos. Es un estudio de carácter experimental llevado a cabo mediante un diseño factorial, lo cual permite evaluar el efecto de las variables independientes (temperatura de conservación y tiempo de residencia de las muestras) sobre 7 indicadores fisicoquímicos que caracterizan el estado del suelo contaminado artificialmente con hidrocarburos del rango orgánico de diésel (Ander Egg, 2011). Se considera como estudio transversal ya que los datos se recolectaron en un único momento para cada tratamiento, y no se realizó un seguimiento continuo de las muestras más allá de los puntos de medición predeterminados (Hernández et al., 2014).

4.1.2. Factores y niveles

Los factores experimentales seleccionados para este estudio fueron la temperatura de conservación y el tiempo de residencia de las muestras, cuyo objetivo fue evaluar la influencia de estos en la perturbación de las concentraciones de indicadores fisicoquímicos que determinan el estado del suelo contaminado con hidrocarburos del rango orgánico de diésel. La **tabla 6** presenta los factores, unidades de medida y los niveles de las variables independientes utilizadas en la investigación.

Tabla 6

Factores Independientes

Factores	Niveles	Unidades
Temperatura de Conservación de la Muestra	3	[°C]
Tiempo de Conservación de la Muestra	2	[Días]

Nota: Elaboración propia.

4.1.3. Tratamientos

En este estudio se analizaron 3 tratamientos experimentales, cada uno representando una combinación única de los niveles de las variables independientes. La **Tabla 7** presenta la permutación de la temperatura de conservación (menor o igual a 0°C, menor o igual a 4°C, y menor o igual a 15°C) y el tiempo de conservación de las muestras (7 y 15 días).

Tabla 7*Tratamientos Experimentales*

Factores	Cantidad de Niveles	Niveles	Unidades
Temperatura de Conservación de la Muestra	3	0°	[°C]
		4°	
		15°	
Tiempo de Conservación de la Muestra	2	7	[Días]
		15	

Nota: Elaboración propia.

4.1.4. Variable respuesta

Las variables respuesta fueron los indicadores fisicoquímicos relacionados con la presencia del TPH-DRO en suelos contaminados. Estas proporcionaron información sobre la afectación e integridad de las muestras antes y después de la contaminación artificial. La **tabla 8** presenta la lista de factores dependientes analizados en el trabajo monográfico.

Tabla 8*Factores Dependientes*

No	Factores	Unidades
1	Hidrocarburos Totales del Petróleo (TPH)	[mg/Kg]
2	Demanda Química de Oxígeno	[mg/L]
3	Demanda Biológica de Oxígeno	
4	Oxígeno disuelto	
5	Potencial de Hidrógeno	Adimensional
6	Conductividad Eléctrica	[μS/cm]
7	Carbono Orgánico Total	[mg/L]

Nota: Elaboración propia.

4.1.5. Hipótesis

Ho (Hipótesis Nula): La concentración del Rango Orgánico de Diésel (TPH-DRO) en suelos contaminados varía con la temperatura debido a su influencia en la perturbación de los indicadores fisicoquímicos relacionados con la presencia de hidrocarburos.

H1 (Hipótesis Alternativa): La concentración del Rango Orgánico de Diésel (TPH-DRO) en suelos contaminados no varía con la temperatura ya que no tiene influencia en la degradación y perturbación de los hidrocarburos y digestores presentes.

4.2. Caracterización fisicoquímica de muestras de suelo contaminado con TPH-DRO

En esta sección se describen los procedimientos y técnicas empleadas para determinar la concentración de los parámetros fisicoquímicos utilizados como indicadores de calidad en las muestras de suelo. Se establecen los materiales, equipos y herramientas utilizadas para el desarrollo de los análisis cuantitativos y cualitativos según “Standard Methods for the examination of water and wastewater”. En el **Anexo 1** se presenta una tabla detallando los equipos, métodos, cristalería y reactivos utilizados para el tratamiento y análisis de las muestras de suelo contaminado por hidrocarburos.

4.2.1. Ubicación del muestreo y colecta de muestra

Para la toma y recolección de muestras de suelo, se utilizó una barra metálica que fue previamente lavada con detergente alcalino “ALCANOX” y agua. En un área no mayor a 100 m², se recolectaron un total de 5 kg de suelo, ubicado en el sector oeste de la Universidad Nacional de Ingeniería, exactamente en la antigua área verde contigua al muro perimetral del portón de acceso peatonal No. 1 (**anexo 2**).

4.2.2. Determinación de la densidad aparente (ρ_a) del suelo

Se utilizó el método del cilindro de volumen conocido para insertar, mediante percusión manual con un martillo, un cilindro de metal con un volumen de 100 ml. Este cilindro recolectó una muestra de suelo que pesó 255.05 g. La muestra fue colocada en una bolsa con cierre hermético y transportada al laboratorio de Edafología de la DACA/UNI, (**anexo 3**). Ahí, se colocó la muestra en un beaker con peso conocido (146.45 g) y seguidamente se expuso a una temperatura de 105°C para su secado por 24h. Una vez seco el suelo, se pesó nuevamente el beaker que lo

contenía (332.3 g). Finalmente, se determinó la densidad aparente del suelo utilizando la **ecuación 1**.

$$\rho_a = \frac{(Masa_{Total} - Masa_{Beaker})}{Volumen_{Cilindro}} \quad \text{ec.1}$$

$$\rho_a = \frac{(332.3 - 146.45)g}{159.04 \text{ cm}^3}$$

$$\rho_a = 1.17 \frac{g}{\text{cm}^3}$$

4.2.3. Tratamiento preliminar del suelo

Los 5 kg de suelo recolectado se colocaron en una bolsa plástica para su almacenamiento. A partir de esta muestra, se seleccionó una porción equivalente a 3.5 kg, de la cual se eliminaron las partículas de gran tamaño, desechos sólidos y material vegetativo. Luego, la muestra se homogenizó y se secó convectivamente a una temperatura de 105°C durante 24 horas en un horno convectivo en el laboratorio de Ingeniería de Procesos de la DACA/UNI.

4.2.4. Determinación de la textura del suelo

Se realizó la caracterización granulométrica de una muestra de suelo de 1000 g mediante el método de análisis por tamizado en seco utilizando un tamiz de vaivén y golpe modelo Ro-TAP® RX29 ubicado en el laboratorio de Ingeniería de Procesos de la DACA/UNI. Los resultados obtenidos fueron representados en un diagrama ternario (**Anexo 5**), empleando la clasificación de tamaños de partícula detallada en la Tabla 9. Esta representación permitió identificar la textura del suelo y clasificarlo de acuerdo con su composición granulométrica.

Tabla 9

Clasificación del tipo de suelo según su tamaño de partícula

Diámetro de partícula	Clasificación
20mm	Piedra
2mm	Grava
0.2mm	Arena gruesa
0.02mm	Arena fina
0.002mm	Limo
<0.002mm	Arcilla

Nota: s.a. (2009). Materiales de Construcción

4.2.5. Establecimiento de la línea de base del suelo sin contaminar (análisis de indicadores en suelo limpio)

Con el objetivo de caracterizar el suelo antes de la adición de combustible para simular la contaminación por hidrocarburos, se pesó una muestra de suelo no contaminado equivalente a 130 gramos, en el laboratorio de Ingeniería Ambiental de la DACA/UNI, a temperatura ambiente. Esta muestra fue denominada como **LBSC** (Línea de Base Sin Contaminar) y fue preparada como un analito para facilitar la transferencia de compuestos químicos del suelo a la alícuota, para posterior ser sometida a los análisis de laboratorio presentados en la **tabla 10**.

Tabla 10

Métodos de laboratorio para la determinación de concentraciones de indicadores fisicoquímicos

No	Indicador	Método
1	Hidrocarburos Totales (TPH)	SM 5520
2	Demanda Química de Oxígeno	SM 5220
3	Demanda Biológica de Oxígeno	SM 5210
4	Oxígeno Disuelto	SM 4500
5	pH	SM 2310
6	Conductividad	SM 2510
7	Carbón Orgánico Total	SM 5310

Nota: Rice et al., (2012).

4.2.6. Métodos analíticos para determinar indicadores fisicoquímicos

Para la determinación de los siete indicadores enlistados en la **Tabla 10**, se utilizaron los procedimientos sugeridos por los *Standar Methods (2012)*. Estos fueron empleados para evaluar las concentraciones en la línea de base del suelo, tanto en condiciones no contaminadas como en suelo contaminado en el día 0. También se emplearon en el análisis de las muestras conservadas a temperaturas de 0°C, 4°C y 15 °C en los días 7 y 15, después de su embalado y preservación. Todos los procedimientos descritos a continuación se realizaron en el laboratorio de Ingeniería Ambiental de la DACA/UNI:

Análisis de hidrocarburos totales de petróleo (TPH)

La determinación de hidrocarburos totales se realizó mediante extracción continua en equipo Soxhlet, empleando hexano como solvente. Aproximadamente 30 g de suelo fueron colocados en cartuchos de celulosa, sometidos a extracción durante 6 horas. El extracto obtenido se concentró en un equipo rotavapor modelo Büchi® R-300 a 85 °C para recuperar el solvente y posteriormente se llevó a peso constante en una balanza analítica modelo Mettler Toledo® (precisión 0,1 mg). La cuantificación se efectuó gravimétricamente, expresando los resultados en mg de hidrocarburos/kg de suelo seco.

Potencial de hidrógeno (pH) y conductividad eléctrica

El pH y la conductividad eléctrica se midieron en extractos acuosos 1:2.5 (suelo: agua destilada), preparados por agitación en agitador orbital durante 1 hora y posterior reposo de 30 minutos. Las determinaciones se realizaron con un potenciómetro modelo Thermo Scientific® STARA2145 ORI, equipado con electrodos combinados para pH y conductividad, previamente calibrados con soluciones estándar trazables a NIST.

Análisis de demanda química de oxígeno por el método de digestión con reactor

La DQO se determinó mediante digestión con dicromato de potasio en medio ácido (H_2SO_4) en tubos COD Hach® para rango alto, utilizando un reactor de digestión Hach® DRB200 a 150 °C durante 2 horas. Posteriormente, las muestras se leyeron en un colorímetro Hach® DR6000 en el programa “COD Rango Alto”. Los resultados se expresaron en $\text{mg O}_2/\text{L}$, de acuerdo con el método SM 5220.

Análisis de demanda biológica de oxígeno (DBO)

La DBO se determinó con el método Winkler modificado (SM 5210). Se preparó agua de dilución enriquecida con nutrientes (N, Mg, P y Ca) y se inocularon botellas DBO de 300 mL con alícuotas de la muestra. Una botella se tituló inmediatamente (DBO inicial) y la otra se incubó a $20\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ durante 5 días en incubadora Thermo Scientific® Precision. Transcurrido el periodo, se repitió el procedimiento Winkler mediante adición de sulfato manganoso, álcali yoduro-azida, ácido sulfúrico y titulación con tiosulfato de sodio 0.025 N, utilizando almidón como indicador. El consumo de oxígeno se expresó como DBO_5 (mg/L O_2).

Análisis de oxígeno disuelto (OD)

El oxígeno disuelto se determinó mediante el método Winkler clásico (SM 4500-O C) en extractos acuosos de suelo contaminado. Para ello, se prepararon suspensiones suelo-agua en proporción 1:2.5 (suelo: agua destilada), las cuales fueron agitadas en agitador orbital durante 1 hora y posteriormente decantadas.

Las determinaciones se realizaron en el sobrenadante, fijando el oxígeno con sulfato manganoso y solución alcalina yoduro-azida directamente en botellas Winkler de 300 mL. Posteriormente, se acidificó con H_2SO_4 concentrado y se tituló con solución de tiosulfato de sodio 0.025 N en presencia de almidón como indicador. Los resultados se expresaron en mg/L O_2 .

Análisis de Carbono orgánico total (COT)

El contenido de carbono orgánico total se determinó mediante el método Walkley-Black, basado en la oxidación húmeda del carbono orgánico con dicromato de potasio ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) en medio ácido. Para el análisis, se pesó 1 g de suelo seco y tamizado en un matraz Erlenmeyer de 250 mL, al cual se añadieron 10 mL de solución de dicromato de potasio 1N.

A continuación, se incorporaron cuidadosamente 20 mL de ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4), agitando suavemente el matraz para garantizar una adecuada mezcla de los reactivos. La muestra se dejó reposar durante 30 minutos, permitiendo la oxidación del carbono orgánico.

Posteriormente, se adicionaron 200 mL de agua destilada para diluir la mezcla y facilitar la titulación. El exceso de dicromato no reducido se valoró mediante titulación con solución de sulfato ferroso amoniacal (sal de Mohr) 0.5 N, utilizando ferroína como indicador. El cambio de color de verde azulado a rojo ladrillo indicó el punto final de la titulación. La concentración de carbono orgánico se calculó a partir de la diferencia entre el volumen de titulante consumido en la muestra y en el blanco.

4.2.7. Preparación de muestras contaminadas con diésel

De acuerdo con la metodología propuesta por Pérez (2024), se preparó una muestra de suelo contaminada artificialmente para el análisis de hidrocarburos totales del petróleo en el rango orgánico del diésel (TPH-DRO). Para ello, se colocaron 3.5 kg de suelo limpio y previamente caracterizado en una caja de muestreo (**ver Anexo 4**), con el objetivo de garantizar una concentración representativa y una adecuada homogeneización del contaminante.

La contaminación artificial se realizó mediante la aplicación de combustible diésel en una proporción de 13 mL por kilogramo de suelo, lo que representó un volumen total de 45.5 mL de diésel para los 3.5 kg de muestra. El diésel fue distribuido uniformemente utilizando un atomizador, mientras se mezcló enérgicamente el suelo en la caja de muestreo. Esta técnica permitió una adecuada aireación, mezcla homogénea y ligera compactación del medio.

Después, se estimó teóricamente la concentración de hidrocarburo en el suelo utilizando la **ecuación 2**, en función de la proporción aplicada.

$$\text{Proporción:}$$

$$\underline{13\text{ml Diésel} : 1\text{kg de Suelo}}$$

$$[\text{Concentración Teórica}] = \frac{(\text{Vol.de Diésel})(\text{Densidad Teórica del Diésel a } 20^{\circ}\text{C})}{(\text{Peso Suelo})} \quad \text{ec. 2}$$

$$[\text{Concentración Teórica}] = \frac{(13 \text{ ml}) \left(0.850 \frac{\text{gr de diésel}}{\text{ml}} \right)}{(1 \text{ kg de suelo})}$$

$$[\text{Concentración Teórica}] = 11.05 \frac{\text{gr de diésel}}{\text{kg de suelo}}$$

$$[\text{Concentración Teórica}] = 11,050 \frac{\text{mg de diésel}}{\text{kg de suelo}}$$

4.2.8. Establecimiento de la línea de base del suelo contaminado (análisis de indicadores en suelo contaminado)

Con el objetivo de caracterizar el suelo tras la adición de combustible, se pesó una muestra de suelo contaminado artificialmente equivalente a 130 gramos. Esta muestra fue denominada **LBCT** y se preparó como un analito para facilitar la transferencia de compuestos químicos del suelo al agua, para luego ser sometida a los análisis de laboratorio presentados en la **tabla 10** y descritos en el apartado **4.2.6**.

4.3. Tendencias y patrones del efecto de la temperatura y el tiempo de conservación sobre el TPH-DRO

Con el fin de identificar tendencias y patrones en el comportamiento del TPH-DRO y de los indicadores fisicoquímicos frente a las variaciones de temperatura y tiempo de residencia, los resultados se procesaron en hojas de cálculo de Excel. Se generaron gráficos de barras comparativos para cada variable de respuesta, permitiendo visualizar las diferencias entre tratamientos y observar la influencia relativa de cada condición experimental, las actividades que dieron lugar para recolectar los datos para este objetivo se detallan a continuación:

4.3.1. Colecta y preservación de muestras

Una vez compactado el suelo contaminado con diésel en la caja de muestreo, se recolectó aproximadamente 2kg de este material. El suelo fue distribuido en 18 frascos de vidrio, cada uno con una capacidad de 4 fl-oz (aproximadamente 118 ml). Posteriormente, cada frasco fue rotulado e identificado de acuerdo con los procedimientos de embalaje y etiquetado establecidos en la Norma Oficial Mexicana **NOM-138-SEMARNAT/SS-2003**.

Para garantizar el cumplimiento de los parámetros de control de calidad, los frascos fueron divididos en 3 grupos iguales, cada uno compuesto por 3 muestras (2 frascos de vidrio por muestra). Estas muestras fueron colocadas en frigoríficos GRS, manteniendo temperaturas constantes de 0 °C, 4 °C y 15 °C, de acuerdo con lo indicado en la **tabla 11**.

Tabla 11

Distribución de las muestras de suelo contaminado en cada frigorífico.

Frigorífico	ID Muestra	Total, de Frascos
Termo 1	T1M1	2 x Cada muestra
	T1M2	
	T1M3	
Termo 2	T2M1	2 x Cada muestra
	T2M2	
	T2M3	
Termo 3	T3M1	2 x Cada muestra
	T3M2	
	T3M3	
Total		18 frascos

Elaboración propia.

Los análisis de los indicadores fisicoquímicos se llevaron a cabo conforme a lo indicado en la **tabla 12**. Esta tabla detalla la identificación del frigorífico, la temperatura establecida, la frecuencia de revisión de la temperatura que se monitoreo con ayuda de un termómetro infrarrojo de alta precisión Testo 845 y la fecha de muestreo analítico.

Tabla 12

Parámetros a controlar, frecuencia de revisión y fecha de muestreo

Frigorífico	Temperatura establecida	Frecuencia de Revisión Temperatura	Fecha de muestreo analítico
Termo 1	0°C	Diaria	7 días después de colectada la muestra.
			15 días después de colectada la muestra.
Termo 2	4°C	Diaria	7 días después de colectada la muestra.
			15 días después de colectada la muestra.
Termo 3	15°C	Diaria	7 días después de colectada la muestra.
			15 días después de colectada la muestra.

Elaboración propia.

4.3.2. Determinación de las concentraciones de los indicadores a temperatura de 0°C, 4°C y 15°C

Tras la recolección y preservación de las muestras, se realizaron los análisis de laboratorio conforme a lo detallado anteriormente en la **tabla 10**. Por razones de logística y capacidad de análisis del laboratorio, las muestras fueron analizadas en tres corridas, con el objetivo de llevar un control más detallado y reducir errores en la obtención de los resultados analíticos.

Las corridas se llevaron a cabo en los meses de marzo a mayo de 2025, comenzando con las muestras a una temperatura inferior a 0 °C, seguidas de las muestras a 15 °C o inferior, y concluyendo con las muestras a 4 °C o inferior. Cabe recalcar que cada muestra fue analizada dentro de los períodos de tiempo establecidos por la norma de referencia.

4.4. Determinación de condiciones óptimas de conservación de muestras de suelo contaminado con TPH-DRO

Para establecer las condiciones óptimas de conservación de las muestras de suelo contaminadas con TPH-DRO, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) de dos vías con replicación, utilizando como variable de respuesta las concentraciones de hidrocarburos del rango orgánico de diésel (TPH-DRO). Los factores evaluados fueron la temperatura de almacenamiento (0 °C, 4 °C y 15 °C) y el tiempo de conservación (7 y 15 días). El procesamiento estadístico se realizó en [nombre del software], considerando un nivel de significancia del 95% ($p < 0.05$).

Adicionalmente, para comparar la homogeneidad de varianzas entre las muestras conservadas a diferentes temperaturas en los tres frigoríficos, se aplicó una prueba F de Fisher. Este análisis permitió verificar la consistencia de los datos y complementar los resultados obtenidos en el ANOVA.

Finalmente, los hallazgos estadísticos se sintetizaron en una representación gráfica (**Figura 14**), en la cual se ilustró la influencia de la temperatura y el tiempo sobre el contenido de TPH-DRO. Esta visualización facilitó la interpretación de las condiciones de preservación más adecuadas para las muestras.

V. Presentación y discusión de resultados

En este apartado se realizó un análisis detallado de los resultados obtenidos en relación con el efecto de la temperatura sobre el contenido de hidrocarburos del rango orgánico de diésel (TPH-DRO) en suelos contaminados. Se inició con la caracterización física del suelo como base para comprender las condiciones iniciales del material, y posteriormente se expusieron los valores obtenidos para los indicadores fisicoquímicos en las distintas etapas de conservación. Estos resultados se complementaron con representaciones gráficas que permitieron visualizar las tendencias y variaciones asociadas a la temperatura y el tiempo de almacenamiento.

Finalmente, se incorporó un análisis estadístico mediante ANOVA de dos vías con replicación, a fin de determinar la significancia de los efectos evaluados y establecer criterios técnicos sobre las condiciones óptimas de preservación de las muestras. Esta discusión proporcionó una comprensión integral del impacto de la temperatura en la degradación de TPH-DRO y su interacción con las propiedades del suelo.

5.1. Caracterización fisicoquímica de muestras de suelo contaminado con TPH-DRO

Con el fin de dar cumplimiento al primer objetivo específico, se presentan los resultados correspondientes a la caracterización inicial del suelo, tanto en condiciones limpias como contaminadas con diésel. En esta etapa se determinó la densidad aparente y la textura del suelo, así como los principales indicadores fisicoquímicos de interés: hidrocarburos totales del petróleo (TPH-DRO), pH, conductividad eléctrica, carbono orgánico total (COT), demanda biológica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO) y oxígeno disuelto (OD). Estos valores constituyen la línea de base sobre la que posteriormente se evaluará el efecto de la temperatura y el tiempo de conservación en las muestras.

5.1.1. Determinación de la densidad aparente (ρ_a) del suelo

El valor de densidad aparente obtenido (1.17 g/cm^3) indica que el suelo presenta una estructura relativamente suelta y porosa. Esta característica puede favorecer tanto la infiltración del contaminante como los procesos de volatilización y biodegradación. En el marco del presente estudio, estas propiedades físicas del suelo influyen directamente en el comportamiento del contenido de hidrocarburos del rango orgánico de diésel (TPH-DRO) frente a diferentes condiciones de temperatura, facilitando su transformación o pérdida dependiendo del tratamiento aplicado (Brady & Weil, 2017).

5.1.2. Determinación de la textura del suelo

Según los resultados presentados en la **tabla 13** e ilustrados en el **Anexo 5**, el suelo analizado muestra un predominio de arena gruesa, combinada con grava muy fina, y contiene bajas proporciones de arena fina, arena muy gruesa y limo grueso. En general, la textura predominante se clasifica como Arena Limosa Ligera.

Tabla 13

Clasificación del suelo estudiado según su textura mediante análisis granulométrico

No de Tamiz	Diámetro de Partícula (mm)	Retención en Tamiz (%)	Clasificación	
08	2.36	29.462	Grava muy fina	
10	1.8	6.192	Arena muy gruesa	Arena (95.833%)
35	0.5	49.402	Arena gruesa	
70	0.212	10.777	Arena fina	
230	0.063	3.563	Limo grueso	Limo (4.167%)
<230	0.05	0.604	Limo grueso	

Elaboración propia.

La presencia de este tipo de textura es habitual en la zona, dado que el Recinto Universitario Simón Bolívar (**UNI-RUSB**) se encuentra a menos de 2 km del complejo volcánico Laguna de Tiscapa, por lo tanto, se considera que el suelo tiene un origen volcánico. Además, el mejoramiento de suelos realizado en el sitio, como resultado de las infraestructuras y trabajos civiles llevados a cabo en la universidad, también influye en sus características físicas.

En el pie de monte y zonas más cercanas a los volcanes se encuentran los suelos con mayores porcentajes de arena, mientras que el contenido de arenas finas y muy finas, limos y algunas texturas francas y franco limosas, con mayores contenidos de arcilla, van apareciendo conforme los suelos se acercan a las costas del Pacífico de Nicaragua (Bendaña García, 2022).

5.1.3. Establecimiento de la línea de base del suelo sin contaminar (análisis de indicadores en suelo limpio)

La muestra de suelo, utilizada como línea de base para el presente trabajo monográfico (**Tabla 14**) y exenta de contaminación artificial, no presenta evidencias de hidrocarburos. Su pH se encuentra en el rango de neutralidad. Al analizar la alícuota a una temperatura ambiente, se observa una conductividad baja, una concentración de oxígeno disuelto dentro de los límites normales y un contenido de carbono orgánico de 20.10 mg/kg. Además, se registra un bajo consumo de oxígeno, asociado a las reacciones químicas de oxidación que ocurren en el medio.

Tabla 14

Concentraciones de indicadores fisicoquímicos en línea de base de la muestra de suelo no contaminada

ID Muestra	Día de análisis	Temperatura	Indicadores	Unidad	Resultados
LBSC*	Día 0	Ambiente	Hidrocarburos Totales de Petróleo (TPH)	mg/kg	0.00
			Demanda Química de Oxígeno	mg/L	180.0
			Demanda Biológica de Oxígeno	mg/L	25.648
			Oxígeno Disuelto	mg/L	7.45
			pH	-	6.9
			Conductividad	µS/cm	87.1
			Carbono Orgánico Total	mg/kg	20.10

Elaboración propia.

5.1.4. Establecimiento de la línea de base del suelo contaminado (análisis de indicadores en suelo contaminado)

En la **Tabla 15**, se observa que la muestra de suelo contaminada artificialmente identificada como LBCT (Línea de Base Contaminada), presenta una concentración de hidrocarburos de 10,333.33 mg/kg, estableciendo una línea base para el análisis fisicoquímico inicial del estudio. El pH del suelo se mantiene en rangos de neutralidad, aunque se anticipa una ligera tendencia hacia la acidez.

En el análisis de una alícuota a temperatura ambiente, se evidencia una reducción del 48% en la conductividad eléctrica, atribuida a la presencia de hidrocarburos, que actúan como aislantes eléctricos. Simultáneamente, se observa el incremento del 30% en la concentración de oxígeno disuelto.

Paralelamente, se documenta una reducción del 22% en la concentración de carbono orgánico total, así como un aumento en el consumo de oxígeno demandado por las reacciones químicas y bioquímicas, incluyendo aquellas relacionadas con la oxidación de compuestos orgánicos e inorgánicos que transcurren en el medio.

Tabla 15

Concentraciones de indicadores fisicoquímicos en línea de base de la muestra de suelo contaminado (día 0)

ID Muestra	Día de análisis	Temperatura	Indicadores	Unidad	Resultados
LBCT*	Día 0	Ambiente	Hidrocarburos Totales de Petróleo (TPH)	mg/kg	10333.33
			Demanda Química de Oxígeno	mg/L	1860.0
			Demanda Biológica de Oxígeno 5	mg/L	306.39
			Oxígeno Disuelto	mg/L	9.66
			pH	-	7.7
			Conductividad	µS/cm	45.1
			Carbono Orgánico Total	mg/kg	15.6

Elaboración propia.

Las variaciones en los indicadores fisicoquímicos están relacionadas con la presencia de hidrocarburos, lo que provoca efectos y cambios en dichos parámetros, “Uno de los efectos adicionales tanto en agua como suelos, es que los derivados del petróleo consumen oxígeno, aumentan la demanda bioquímica y pueden generar condiciones anóxicas” (Arias, 2017).

5.2. Tendencias y patrones del efecto de la temperatura y el tiempo de conservación sobre el TPH-DRO

En correspondencia con el segundo objetivo específico, en esta sección se muestran los resultados obtenidos al conservar las muestras de suelo contaminado a 0, 4 y 15 °C durante 7 y 15 días. Se discuten los cambios observados en las concentraciones de TPH-DRO y los indicadores fisicoquímicos, resaltando las tendencias y patrones que evidencian la influencia de la temperatura.

5.2.1. Preservación de las muestras

Desde el día 0 hasta el día 15, las muestras se conservaron en tres frigoríficos, manteniendo las temperaturas estipuladas para el experimento. Se llevó a cabo un monitoreo diario de la temperatura interna de cada frigorífico en las primeras horas de la jornada. Para este propósito, se utilizó una porción de suelo dispuesta de manera idéntica a las muestras, colocada en un frasco de vidrio como blanco de control térmico. Esta muestra no fue objeto de análisis en el experimento, ya que su función se limitó a la monitorización de la temperatura. La **Tabla 16** presenta los datos generados y recopilados a lo largo de los 15 días de la experimentación.

Tabla 16

Registro de temperatura por cada frigorífico

Día	Temperatura (°C)		
	Frigorífico 1	Frigorífico 2	Frigorífico 3
0	-1	4	13
1	0	2	14
2	1	1	13
3	-1	4	15
4	-1	4	15
5	0	4	15
6	0	2	15
7	-1	3	17
8	1	1	17
9	0	3	15
10	-1	3	15
11	-1	3	15
12	1	4	17
13	0	5	17
14	-1	1	13
15	0	5	14

Elaboración propia.

La **Tabla 17** presenta el comportamiento estadístico de la temperatura durante los 15 días de experimentación. Se observa que la temperatura promedio se mantiene dentro del máximo permisible para cada agrupación de frigoríficos. La desviación estándar de las muestras indica que, en el grupo 1, los valores son más estables y se encuentran cerca de la media; sin embargo, en los grupos 2 y 3 se evidencia una mayor amplitud en la dispersión de los datos de temperatura.

Las **Figuras 4, 5 y 6** ilustran el comportamiento de la temperatura a través de gráficos de control, donde se muestran los valores máximos permitidos para las muestras.

Tabla 17

Comportamiento estadístico de la temperatura

Medida	Frigorífico 1	Frigorífico 2	Frigorífico 3
Promedio	-0.25 °C	3.06 °C	15 °C
Moda	-1°C	4°C	15°C
Desviación Estándar	0.75	1.297533718	1.369306394
Varianza	0.5625	1.68359375	1.875

Elaboración propia.

Figura 4

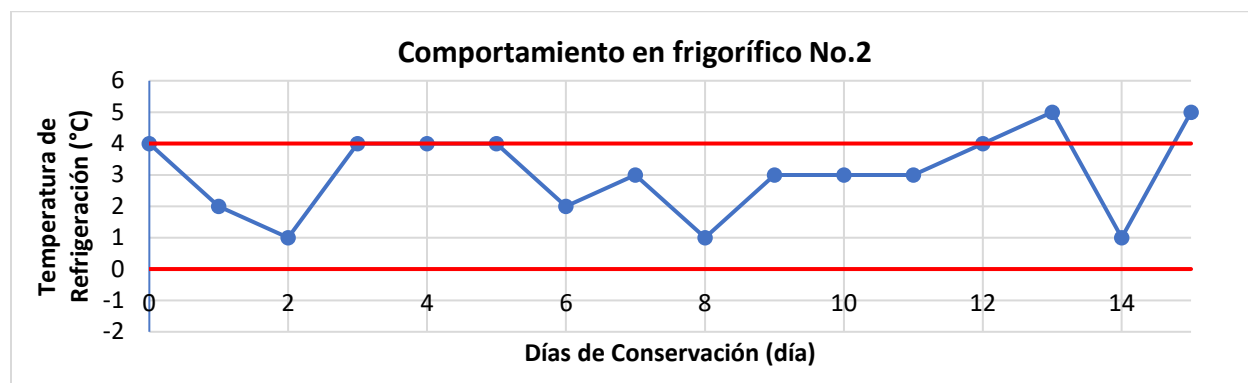
Comportamiento de la temperatura con respecto al tiempo en frigorífico No.1



Elaboración propia.

Figura 5

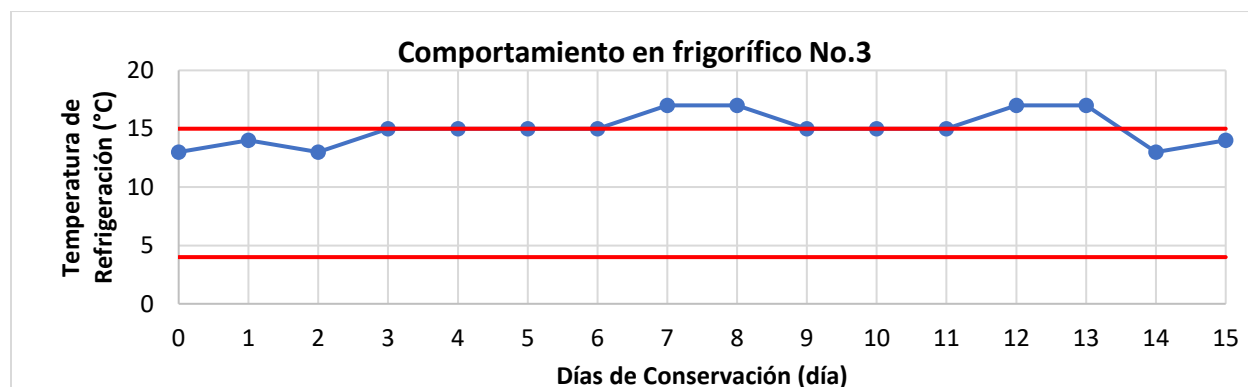
Comportamiento de la temperatura con respecto al tiempo en frigorífico No.2



Elaboración propia.

Figura 6

Comportamiento de la temperatura con respecto al tiempo en frigorífico No.3



Elaboración propia.

5.2.2. Determinación de las concentraciones de los indicadores a temperaturas de 0°C

La **Tabla 18** presenta el comportamiento de las muestras 1, 2 y 3 del frigorífico 1 (0°C). En el día 7, se observa que el suelo contaminado presenta valores ligeramente reducidos, pero comparables a las concentraciones de TPH registradas en la línea de base del día 0. El pH del suelo se mantiene dentro del rango de neutralidad, similar al obtenido en el día 0. Las alícuotas analizadas de las tres muestras reflejan valores consistentes de conductividad, atribuibles a las bajas temperaturas de preservación.

Asimismo, se documenta un aumento en las concentraciones de carbono orgánico total, junto con una disminución en las concentraciones de oxígeno disuelto, también vinculada a las condiciones de conservación. Por último, se observa una reducción en la demanda química de oxígeno y variaciones en la demanda biológica de oxígeno, asociadas a la actividad bioquímica presente en las muestras.

En el día 15, las concentraciones de TPH disminuyen en más del 50% en comparación con el día 0. El pH del suelo se mantiene dentro del rango de neutralidad, aunque presenta una tendencia hacia la acidificación, atribuida a la presencia de diésel en el suelo. Las alícuotas analizadas reflejan un aumento en los valores de conductividad, lo que sugiere la presencia de compuestos orgánicos e inorgánicos resultantes del proceso de oxidación de los contaminantes y otros compuestos en el suelo.

Las concentraciones de carbono orgánico total permanecen similares a las registradas en el día 7. Además, se observa un incremento en las concentraciones de oxígeno disuelto, con valores constantes en la demanda química de oxígeno, así como un aumento en la demanda biológica de oxígeno, asociado a las reacciones bioquímicas que ocurren en el medio.

Tabla 18

Concentraciones de indicadores fisicoquímicos de las muestras conservadas en frigorífico No.1 y analizada al 7mo y 15vo día de conservación

ID Frigorífico	T (°C)	Indicadores	Día de análisis	Unidad	Resultados ID Muestras		
					T1M1	T1M2	T1M3
TERMO 1	0°C	Hidrocarburos Totales de Petróleo (TPH)	Día 7	mg/kg	9412.53	9308.51	9615.38
			Día 15		4281.95	4958.68	4287.60
		Demanda Química de Oxígeno	Día 7	mg/L	1540.00	1280.00	1200.00
			Día 15		1580.00	1220.00	1020.00
		Demanda Biológica de Oxígeno	Día 7	mg/L	183.04	366.08	28.76
			Día 15		1155.85	787.86	606.45
		Oxígeno Disuelto	Día 7	mg/L	8.86	6.64	15.50
			Día 15		10.07	9.46	9.66
		pH	Día 7	-	7.60	7.60	7.50
			Día 15		6.70	6.90	7.00
		Conductividad	Día 7	µS/cm	44.80	44.60	44.90
			Día 15		65.60	59.70	62.00
		Carbono Orgánico Total	Día 7	mg/kg	24.75	20.55	22.65
			Día 15		22.80	19.35	22.05

Elaboración propia.

5.2.3. Determinación de las concentraciones de los indicadores a temperaturas de 4°C

La **Tabla 19** detalla el comportamiento de las muestras 1, 2 y 3 del frigorífico 2 (4°C). En el día 7, el suelo contaminado presenta valores ligeramente reducidos, aunque similares a las concentraciones de TPH de la línea de base del día 0. El pH se mantiene dentro del rango de neutralidad, pero muestra una tendencia hacia la acidificación debido a la presencia de TPH-DRO. Las alícuotas analizadas indican una disminución en los valores de conductividad en comparación con el día 0. Las concentraciones de carbono orgánico total permanecen estables, y los niveles de oxígeno disuelto son comparables a los observados anteriormente. Sin embargo, se registra una reducción en la demanda química de oxígeno (DQO) en relación con el día 0, y los valores de demanda biológica de oxígeno (DBO) son bajos en comparación con los datos iniciales.

Tabla 19

Concentraciones de indicadores fisicoquímicos de las muestras conservadas en frigorífico No.2, analizada al 7mo y 15vo día de conservación

ID Frigorífico	T (°C)	Indicadores	Día de análisis	Unidad	Resultados ID Muestras		
					T2M1	T2M2	T2M3
TERMO 2	≤4°C	Hidrocarburos Totales de Petróleo (TPH)	Día 7	mg/kg	9803.92	9966.78	9803.92
			Día 15		9900.99	9966.78	9868.42
		Demanda Química de Oxígeno	Día 7	mg/L	420.00	460.00	600.00
			Día 15		460.00	420.00	640.00
		Demanda Biológica de Oxígeno	Día 7	mg/L	30.20	129.89	28.15
			Día 15		194.84	140.93	223.71
		Oxígeno Disuelto	Día 7	mg/L	11.28	9.26	8.86
			Día 15		10.07	10.07	10.27
		pH	Día 7	-	6.5	6.5	6.4
			Día 15		6.7	6.3	6.4
		Conductividad	Día 7	µS/cm	29.05	23.65	24.19
			Día 15		29.7	27.52	32.7
		Carbono Orgánico Total	Día 7	mg/kg	14.85	19.5	15.6
			Día 15		10.5	15.15	15.75

Elaboración propia.

En el día 15, las concentraciones de TPH se mantienen similares a las observadas anteriormente. El pH del suelo se considerará ácido, como lo indican los valores persistentes a lo largo del tiempo de experimentación. Las alícuotas analizadas muestran conductividades similares a las del día 7, así como concentraciones de Carbono Orgánico Total que también son semejantes. Además, se observan similitudes en las concentraciones de oxígeno disuelto y una constancia aproximada en las concentraciones de Demanda Química de Oxígeno (DQO), mientras que se registra un aumento en las concentraciones de Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), en comparación con el análisis realizado en el día 7.

5.2.4. Determinación de las concentraciones de los indicadores a temperaturas de 15°C

La **Tabla 20** presenta el comportamiento de las muestras 1, 2 y 3 del frigorífico 3 (15°C). En el día 7 del experimento, se registran variaciones en las concentraciones de TPH en comparación con la línea de base. Asimismo, los valores de pH se sitúan ligeramente dentro del rango alcalino en relación con dicha línea.

Las alícuotas analizadas para los indicadores fisicoquímicos muestran similitudes en los valores de conductividad con respecto al día 0 del experimento, así como un aumento en las concentraciones de Carbono Orgánico Total (COT), variaciones en los niveles de oxígeno disuelto, y un incremento en las demandas química (DQO) y biológica de oxígeno (DBO).

En el análisis realizado el día 15, se observan variaciones en las concentraciones de TPH en comparación con los días 0 y 7, y los valores de pH experimentan una disminución respecto a los análisis anteriores. Las alícuotas analizadas mantienen la constancia y similitud en los valores de conductividad eléctrica y en las concentraciones de Carbono Orgánico Total. También se detecta una similitud en los niveles de oxígeno disuelto en comparación con el día 7, variaciones en las concentraciones de DQO, así como una reducción en la demanda biológica de oxígeno.

Tabla 20

Concentraciones de indicadores fisicoquímicos de las muestras conservadas en frigorífico No.3, analizada al 7mo y 15vo día de conservación

ID Frigorífico	T (°C)	Indicadores	Día de análisis	Unidad	Resultados ID Muestras		
					T3M1	T3M2	T3M3
TERMO 3	≤15°C	Hidrocarburos Totales de Petróleo (TPH)	Día 7	mg/kg	9505.08	8524.59	9430.89
			Día 15		5649.72	8138.02	8245.38
		Demanda Química de Oxígeno	Día 7	mg/L	2600.00	2520.00	3560.00
			Día 15		2740.00	1000.00	2140.00
		Demanda Biológica de Oxígeno	Día 7	mg/L	1891.39	1539.67	966.44
			Día 15		389.69	119.8465	826.01
		Oxígeno Disuelto	Día 7	mg/L	10.87	7.25	11.28
			Día 15		10.07	8.05	11.48
		pH	Día 7	-	8.8	8.5	8.2
			Día 15		7.6	7.6	7.8
		Conductividad	Día 7	µS/cm	52.30	49.80	51.6
			Día 15		45.5	48.4	46.0
		Carbono Orgánico Total	Día 7	mg/kg	22.65	22.50	22.65
			Día 15		21.15	20.10	21.45

Elaboración propia.

5.2.5. Comportamiento de hidrocarburos totales del petróleo (TPH) ante la variación de temperatura y tiempo de conservación

En la **Tabla 21** y **Figura 7** se muestran las concentraciones de TPH obtenidas en el análisis realizado en los días 7 y 15; Tomando en cuenta los valores máximos de temperatura y tiempo de conservación presentados en la **Tabla 5** para el análisis de hidrocarburos de fracción media y de acuerdo con la norma de referencia **NOM-138-SEMARNAT/SS-2003**, se compararon los resultados y se observó que:

- Las muestras conservadas a una temperatura **≤0°C** muestran una reducción de las concentraciones, pasando de 10,333.33 mg/kg a aproximadamente 4,000 mg/kg, con un comportamiento de disminución en las tres muestras analizadas. Esta reducción puede estar relacionada con la emulsificación del combustible. Según *Salih* (2017), el combustible diésel es higroscópico, lo que significa que atrae y retiene agua del ambiente donde se almacena.

En este caso, la emulsificación facilitaría la mezcla con el agua por la humedad del medio, lo que puede resultar en que la mezcla se adhiera a las paredes del frasco utilizado.

- b) Las muestras almacenadas a $\leq 4^{\circ}\text{C}$ presentan un comportamiento constante durante los 15 días de análisis, con concentraciones que oscilan entre 9,803.92 mg/kg y 9,966.78 mg/kg, mostrando una reducción de no más del 5% respecto a las concentraciones iniciales. El análisis gráfico indica una tendencia lineal.
- c) Las muestras almacenadas a $\leq 15^{\circ}\text{C}$ presentan concentraciones fluctuantes de 5,649.72 mg/kg y 9505.08 mg/kg en los días 7 y 15, con variaciones superiores al $\pm 10\%$ respecto a la concentración inicial. El análisis gráfico indica una tendencia decreciente en las concentraciones de hidrocarburos, probablemente atribuida a la volatilización de los Hidrocarburos Policíclicos Aromáticos (HAP's) por influencia de la presión de vapor durante el almacenamiento y manipulación.

La presión de vapor de los HAPs disminuye con el aumento del peso molecular. Una vez liberados a la atmósfera, los HAPs se encuentran en dos fases separadas, una fase de vapor y una fase sólida en la que los HAPS son adsorbidos sobre materia particulada (Dumitrescu, 2018).

Tabla 21

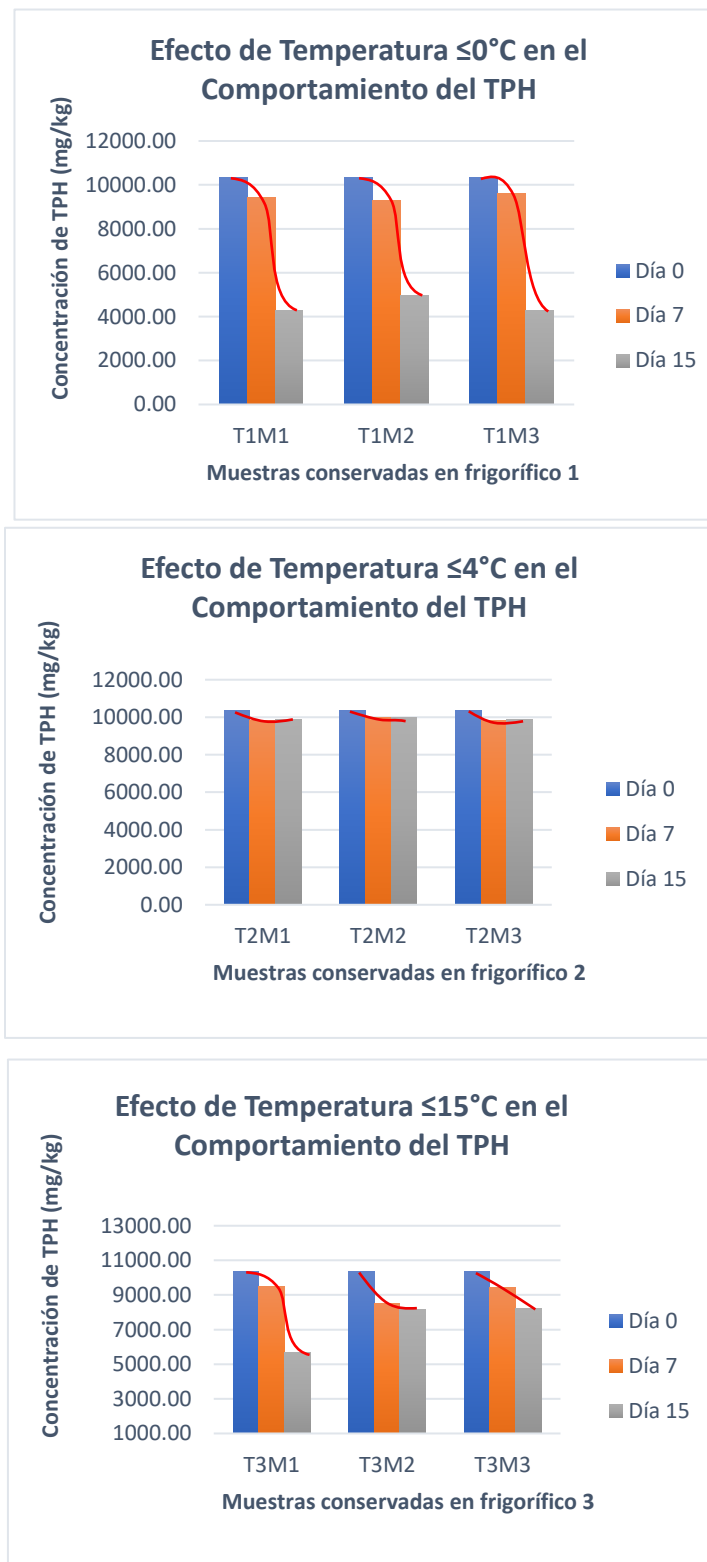
Comportamiento de los resultados analíticos de TPH ante la variación de temperatura de conservación en muestras de suelo contaminado

Frigoríficos	ID Muestra	Concentración (mg/kg)				
		Día 0	Día 7	%Variación	Día 15	%Variación
Termo 1	T1M1	10333.33	9412.53	-9%	4281.95	-59%
	T1M2	10333.33	9308.51	-10%	4958.68	-52%
	T1M3	10333.33	9615.38	-7%	4287.60	-59%
Termo 2	T2M1	10333.33	9803.92	-5%	9900.99	-4%
	T2M2	10333.33	9966.78	-4%	9966.78	-4%
	T2M3	10333.33	9803.92	-5%	9868.42	-4%
Termo 3	T3M1	10333.33	9505.08	-8%	5649.72	-45%
	T3M2	10333.33	8524.59	-18%	8138.02	-21%
	T3M3	10333.33	9430.89	-9%	8245.38	-20%

Elaboración propia.

Figura 7

Efecto del rango de temperatura en las concentraciones de hidrocarburos totales del petróleo



Elaboración propia

5.2.6. Comportamiento de potencial de hidrógeno (pH) ante la variación de temperatura y tiempo de conservación

Al estudiar las muestras según el siguiente indicador fisicoquímico, se observó que:

- Las muestras almacenadas a temperaturas de $\leq 0^{\circ}\text{C}$ muestran valores de pH que fluctuaron entre -1% y -13% en comparación con la línea de base, con una tendencia a la reducción a partir del día 7, indicando un suelo ácido. Gráficamente, las líneas de tendencia evidencian esta disminución, orientándose hacia la acidez (valores inferiores a 6.90), manteniéndose constantes a lo largo de los 15 días del experimento. Este comportamiento se relaciona con la inhibición de las reacciones formadoras de ácidos orgánicos, según Calderón Gómez (2006).
- Las muestras almacenadas a temperaturas de $\leq 4^{\circ}\text{C}$ presentan valores de pH que oscilan entre -13% y -18% en comparación con la línea de base, mostrando una tendencia a la acidificación del suelo durante los 15 días del experimento. Gráficamente, se observa un aumento de la acidez en comparación con otros frigoríficos, siendo esta la temperatura en la que los suelos se comportan normalmente, sin inhibición o aceleración de sus reacciones.
- Las muestras conservadas a una temperatura de $\leq 15^{\circ}\text{C}$ muestran un comportamiento de alcalinización. "Un suelo alcalino o calcáreo contiene carbonato de calcio libre, y no necesariamente son salinos ni salino-sódicos" (FERTILAB, s.f.). A temperaturas más altas, la velocidad de reacción facilita la oxidación y el desplazamiento de carbonos en la cadena de TPH-DRO del suelo analizado. Como resultado, no se acidifica y se mantiene en un rango neutro-alcalino.

Tabla 22

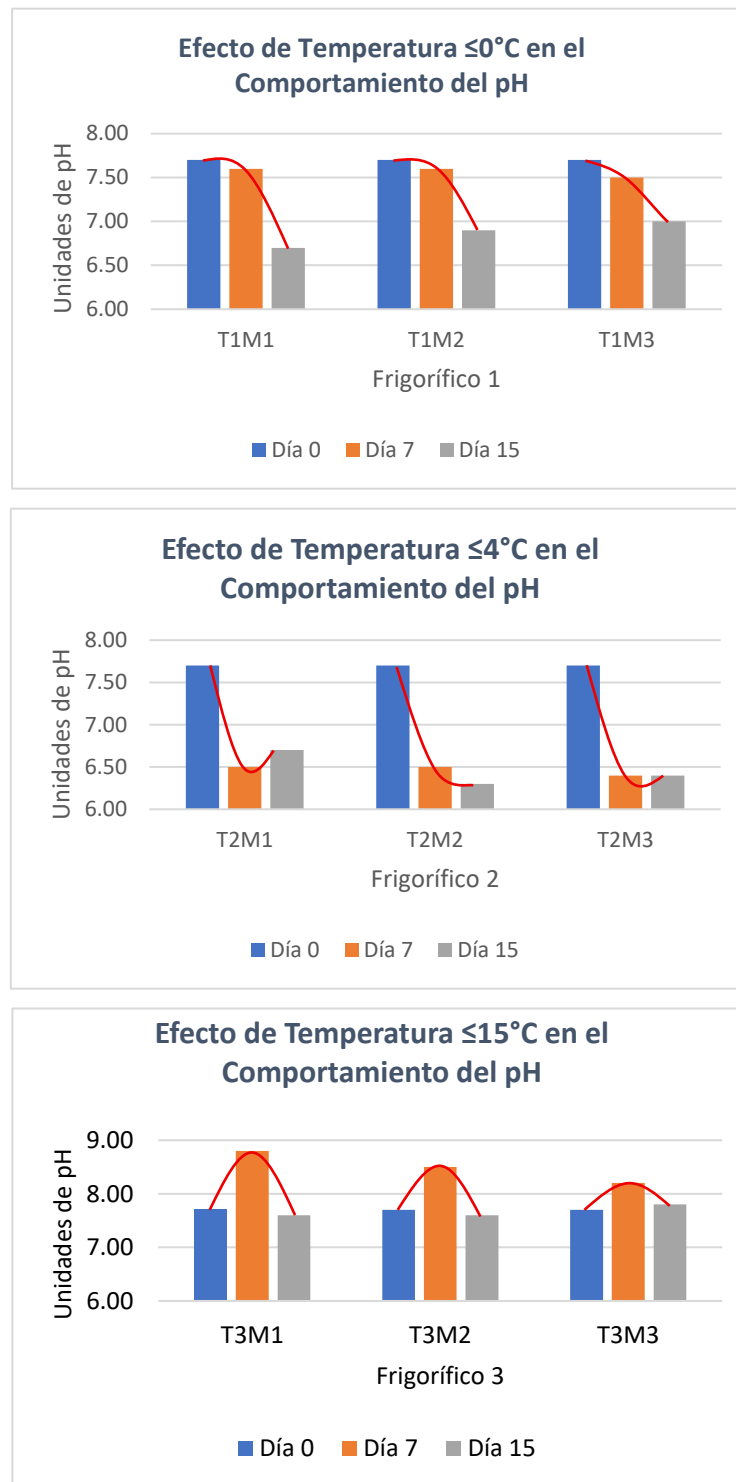
Comportamiento de los resultados analíticos de pH ante la variación de temperatura de conservación en muestras de suelo contaminado

Frigoríficos	ID Muestra	Valores				
		Día 0	Día 7	% Variación	Día 15	% Variación
Termo 1	T1M1	7.70	7.60	-1%	6.70	-13%
	T1M2	7.70	7.60	-1%	6.90	-10%
	T1M3	7.70	7.50	-3%	7.00	-9%
Termo 2	T2M1	7.70	6.50	-16%	6.70	-13%
	T2M2	7.70	6.50	-16%	6.30	-18%
	T2M3	7.70	6.40	-17%	6.40	-17%
Termo 3	T3M1	7.70	8.80	14%	7.60	-1%
	T3M2	7.70	8.50	10%	7.60	-1%
	T3M3	7.70	8.20	6%	7.80	1%

Elaboración propia.

Figura 8

Efecto del rango de temperatura en los valores de pH



Elaboración propia.

5.2.7. Comportamiento de conductividad eléctrica ante la variación de temperatura y tiempo de conservación

La conductividad eléctrica del suelo es directamente proporcional a la temperatura, ya que ésta influye en la solubilización de las sales disueltas, cuyas concentraciones se reflejan en este indicador. Sin embargo, los compuestos orgánicos tienden a ser aislantes eléctricos y no contribuyen a la conducción de corriente en el medio. Esta idea está respaldada por explicaciones técnicas que indican que la conductividad eléctrica aumenta con la temperatura debido a la mayor movilidad iónica y solubilidad de sales, mientras que los compuestos orgánicos, por su estructura molecular, no facilitan la conducción eléctrica (Velásquez et al., 2022). Al estudiar las muestras según el indicador fisicoquímico anterior, se observó lo siguiente:

- a) Las muestras de suelo conservadas a una temperatura $\leq 0^{\circ}\text{C}$ presentan variaciones de -1% en el día 7 y entre 32% y 45% en el día 15 en comparación con la línea de base. Gráficamente, se observa una tendencia constante en las tres muestras, lo que indica una curva ascendente. El aumento de los valores de conductividad en el día 15 podría estar relacionado con la disminución de las concentraciones de TPH en estas muestras. A medida que disminuye la cantidad de compuestos orgánicos (en este caso, combustibles del rango TPH-DRO), el material de la muestra deja de comportarse como un aislante y comienza a actuar como un conductor.
- b) Las muestras de suelo conservadas a una temperatura $\leq 4^{\circ}\text{C}$ muestran una reducción en los valores de conductividad, variando entre -36% y 48% en el día 7, y entre -27% y 39% en el día 15 en comparación con la línea de base. Gráficamente, se observa un comportamiento constante que presenta una tendencia de decaimiento en el día 7 y un crecimiento en el día 15, reflejándose como una parábola cóncava hacia arriba. Las reducciones en los valores de conductividad están relacionadas tanto con la temperatura de conservación, considerada baja, como con el comportamiento no conductivo de la corriente eléctrica debido a la presencia de combustible en el material.
- c) Las muestras conservadas a una temperatura $\leq 15^{\circ}\text{C}$ presentan valores de conductividad que no varían más del 16% a lo largo de los 15 días de experimentación. Gráficamente, los valores de conductividad se mantienen similares durante este período, mostrando una tendencia constante en forma de parábola cóncava hacia abajo, con brazos menos extendidos. Este comportamiento se puede atribuir a los rangos de temperatura alcanzados, lo que genera una mayor solubilidad de las sales y carbonatos presentes en el medio analizado.

Tabla 23

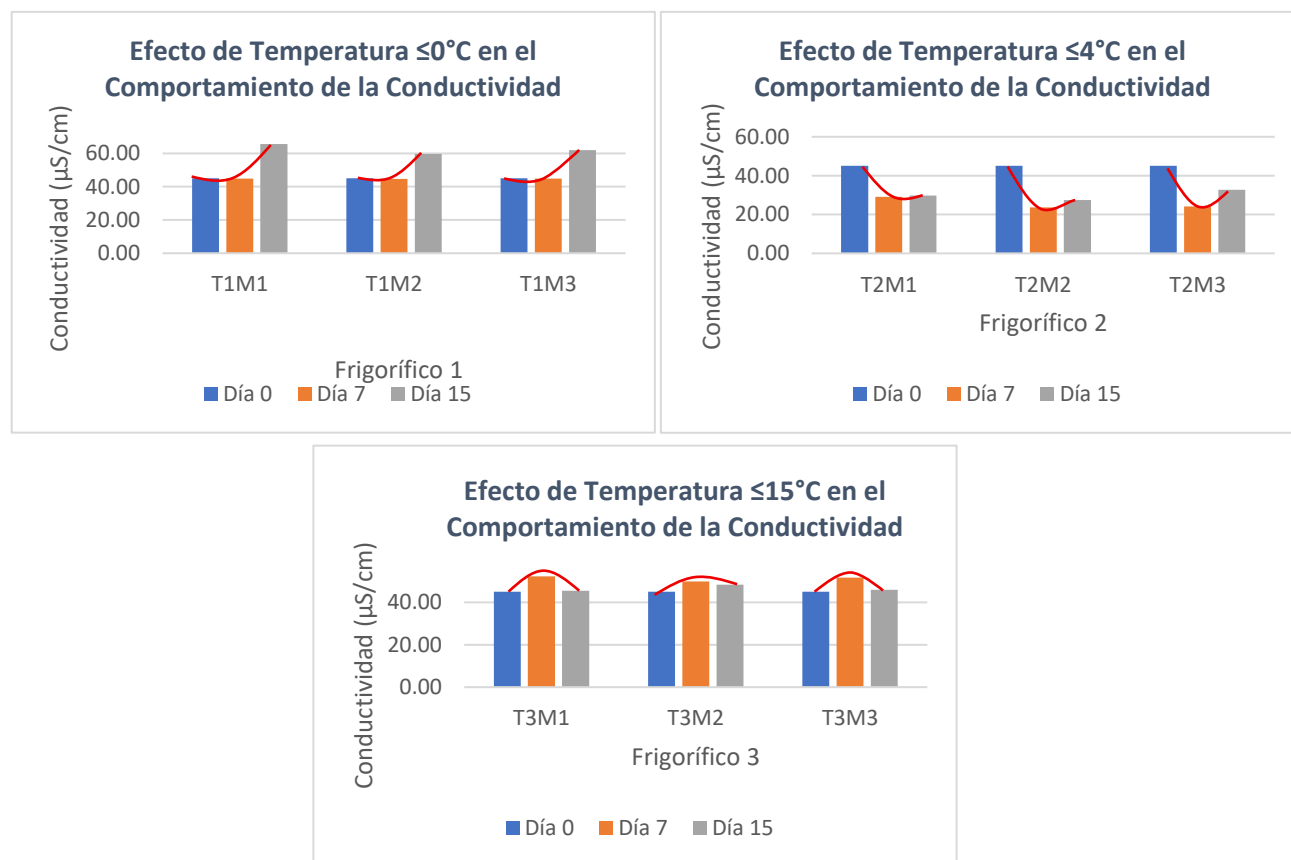
Comportamiento de los resultados analíticos de conductividad eléctrica ante la variación de temperatura de conservación en muestras de suelo contaminado

Frigoríficos	Muestra	Valores ($\mu\text{S/cm}$)				
		Día 0	Día 7	%Variación	Día 15	% Variación
Termo 1	T1M1	45.10	44.80	-1%	65.60	45%
	T1M2	45.10	44.60	-1%	59.70	32%
	T1M3	45.10	44.90	0%	62.00	37%
Termo 2	T2M1	45.10	29.05	-36%	29.70	-34%
	T2M2	45.10	23.65	-48%	27.52	-39%
	T2M3	45.10	24.19	-46%	32.70	-27%
Termo 3	T3M1	45.10	52.30	16%	45.50	1%
	T3M2	45.10	49.80	10%	48.40	7%
	T3M3	45.10	51.60	14%	46.00	2%

Elaboración propia.

Figura 9

Efecto del rango de temperatura en los valores de conductividad



Elaboración propia.

5.2.8. Comportamiento del carbono orgánico total (COT) ante la variación de temperatura y tiempo de conservación

El carbono orgánico total (COT) en suelos contaminados con hidrocarburos de petróleo como el diésel representa, en buena medida, el contenido de carbono proveniente de estos contaminantes. Los hidrocarburos del diésel están compuestos por cadenas alifáticas (C10–C25), muchas de las cuales son persistentes en el ambiente, y se incluyen dentro del carbono orgánico total medido por combustión o métodos químicos.

Al estudiar las muestras según el indicador fisicoquímico anterior, se observó lo siguiente:

- a) En las muestras de suelo contaminado conservadas a una temperatura $\leq 0^{\circ}\text{C}$ hubo un aumento marcado del COT del día 0 al día 7 y 15 en todas las muestras (hasta +59%). El gráfico superior izquierdo de la figura 10 muestra un claro incremento progresivo (especialmente T1M1). A estas temperaturas, la actividad microbiana es prácticamente nula, lo que inhibe la biodegradación de los hidrocarburos. Según Muskus y Santoyo (2014), “El aumento del COT puede deberse a la liberación de compuestos más solubles por fraccionamiento físico del diésel con el tiempo, lo que permite la conservación del COT derivado del diésel y refleja la persistencia de la contaminación a bajas temperaturas” (Muskus, 2014).
- b) En contraste, las muestras conservadas a aproximadamente 4°C (Termo 2) mostraron comportamientos más estables, e incluso reducciones en el contenido de COT, con una disminución de hasta el 33 % en T2M1. Este resultado sugiere una activación moderada de comunidades microbianas psicrófilas o mesófilas, que podrían haber iniciado procesos de degradación aerobia del diésel, liberando subproductos como CO_2 o transformando fracciones menos solubles en compuestos no detectables en el análisis de COT (Whyte et al., 1998; Kalbitz et al., 2003).
- c) En las muestras almacenadas a $\leq 15^{\circ}\text{C}$ (Termo 3), el COT mostró una tendencia creciente más moderada, con incrementos de hasta el 38 %. Este comportamiento puede explicarse por un equilibrio entre la liberación de fracciones orgánicas más móviles del diésel (debido a su desorción del suelo o transformación fisicoquímica) y una biodegradación parcial por microorganismos presentes en el suelo (Leahy & Colwell, 1990). Aunque no se observaron reducciones como en el caso del Termo 2, la magnitud del aumento fue menor que a $\leq 0^{\circ}\text{C}$, lo cual podría deberse a una mayor dinámica de transformación del carbono a temperaturas templadas.

Tabla 24

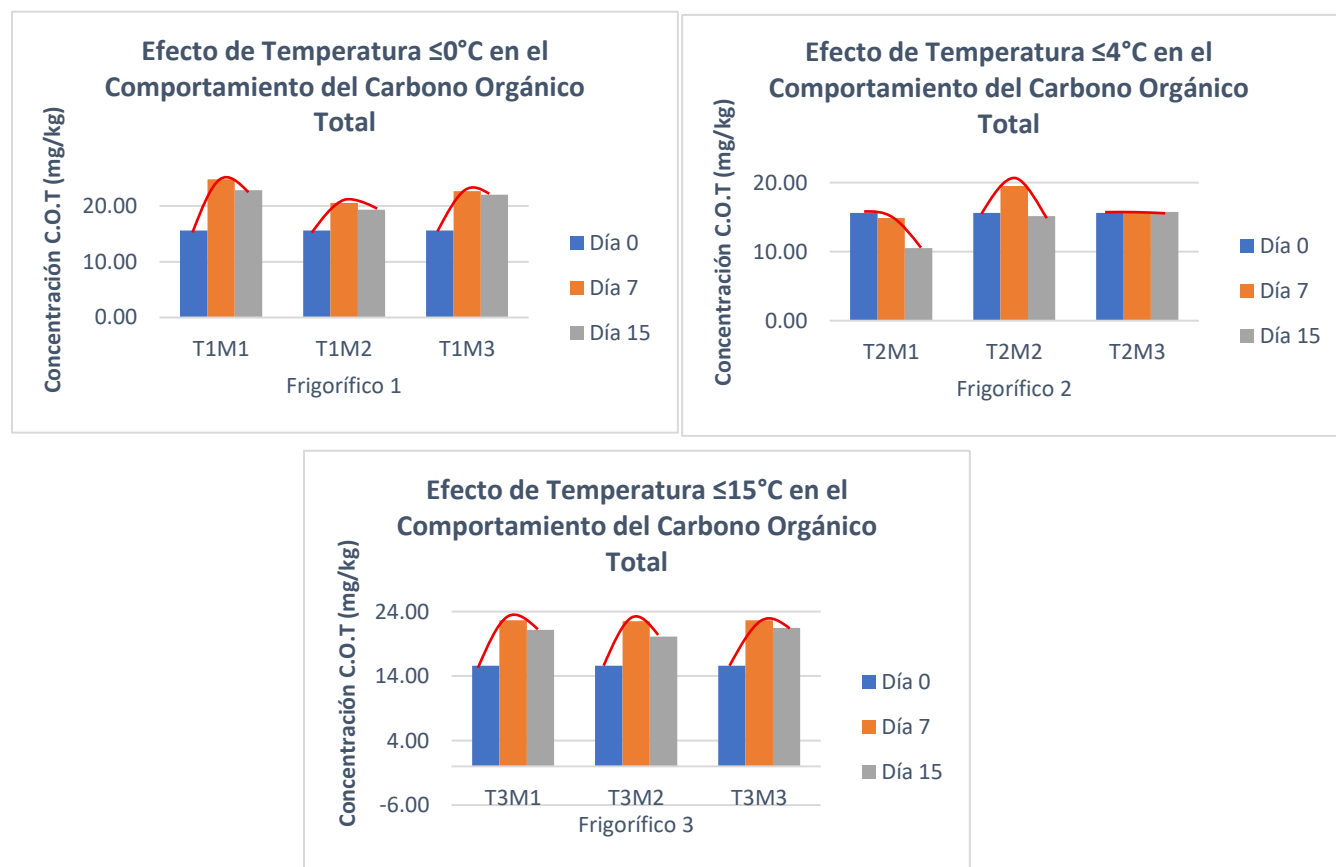
Comportamiento de los resultados analíticos de COT ante la variación de temperatura de conservación en muestras de suelo contaminado

Frigoríficos	Muestra	Concentración (mg/kg)				
		Día 0	Día 7	%Variación	Día 15	%Variación
Termo 1	T1M1	15.60	24.75	59%	22.80	46%
	T1M2	15.60	20.55	32%	19.35	24%
	T1M3	15.60	22.65	45%	22.05	41%
Termo 2	T2M1	15.60	14.85	-5%	10.50	-33%
	T2M2	15.60	19.50	25%	15.15	-3%
	T2M3	15.60	15.60	0%	15.75	1%
Termo 3	T3M1	15.60	22.65	45%	21.15	36%
	T3M2	15.60	22.50	44%	20.10	29%
	T3M3	15.60	22.65	45%	21.45	38%

Elaboración propia.

Figura 10

Efecto del rango de temperatura en las concentraciones de carbono orgánico total



Elaboración propia.

5.2.9. Comportamiento de la demanda biológica de oxígeno (DBO) ante la variación de temperatura y tiempo de conservación

La determinación de este parámetro se justifica por su capacidad para reflejar el grado de contaminación de la alícuota con materia biodegradable. Este grado se determina por la cantidad de oxígeno disuelto consumido en el metabolismo microbiano, lo que está directamente relacionado con la presencia de agentes biodegradables, como bacterias y hongos, así como con condiciones ambientales, como la temperatura. En consecuencia, este parámetro está sujeto a la cinética bacteriana. Se obtuvieron las siguientes concentraciones:

- a) A una temperatura de $\leq 0^{\circ}\text{C}$, se observa un decaimiento en la DBO debido a la adaptación de los microorganismos durante los primeros 7 días. Esto indica que los agentes degradadores se encuentran entre la fase lag y la fase de crecimiento. Como resultado, al día 15, las concentraciones aumentan y superan la línea de base. Cabe recalcar que las concentraciones no superan la línea de base hasta después del día 7.
- b) A una temperatura de $\leq 4^{\circ}\text{C}$, se observa un decaimiento en las concentraciones de la DBO durante 15 días en comparación con la línea de base, con una reducción de hasta el 91% de las concentraciones. Este resultado es deseado en este tipo de estudios, ya que el crecimiento de los agentes degradadores es proporcional a la temperatura. Gráficamente, se observa una reducción en las concentraciones, con las tres muestras mostrando una tendencia constante reflejada mediante una parábola cóncava hacia arriba. Al día 15, se observa un aumento en las concentraciones de la DBO, lo que se relaciona con la fase de crecimiento de la cinética bacteriana, aunque sin superar la concentración de la línea de base.
- c) A una temperatura de conservación $\leq 15^{\circ}\text{C}$, se observa un aumento de hasta el 517% en las concentraciones durante los primeros 7 días, seguido de una reducción hasta el análisis del día 15. Se deduce que los agentes degradadores en la muestra pasaron por las 4 fases de la cinética bacteriana: el aumento de las concentraciones coincide con la fase de crecimiento exponencial, mientras que la fase de reducción refleja la fase estacionaria y posterior de muerte. Gráficamente, se obtiene un comportamiento constante en las 3 muestras, mostrando una tendencia reflejada por una parábola cóncava hacia abajo. Las temperaturas agradables en las que se conservó la muestra son propicias para el crecimiento microbiano.

Tabla 25

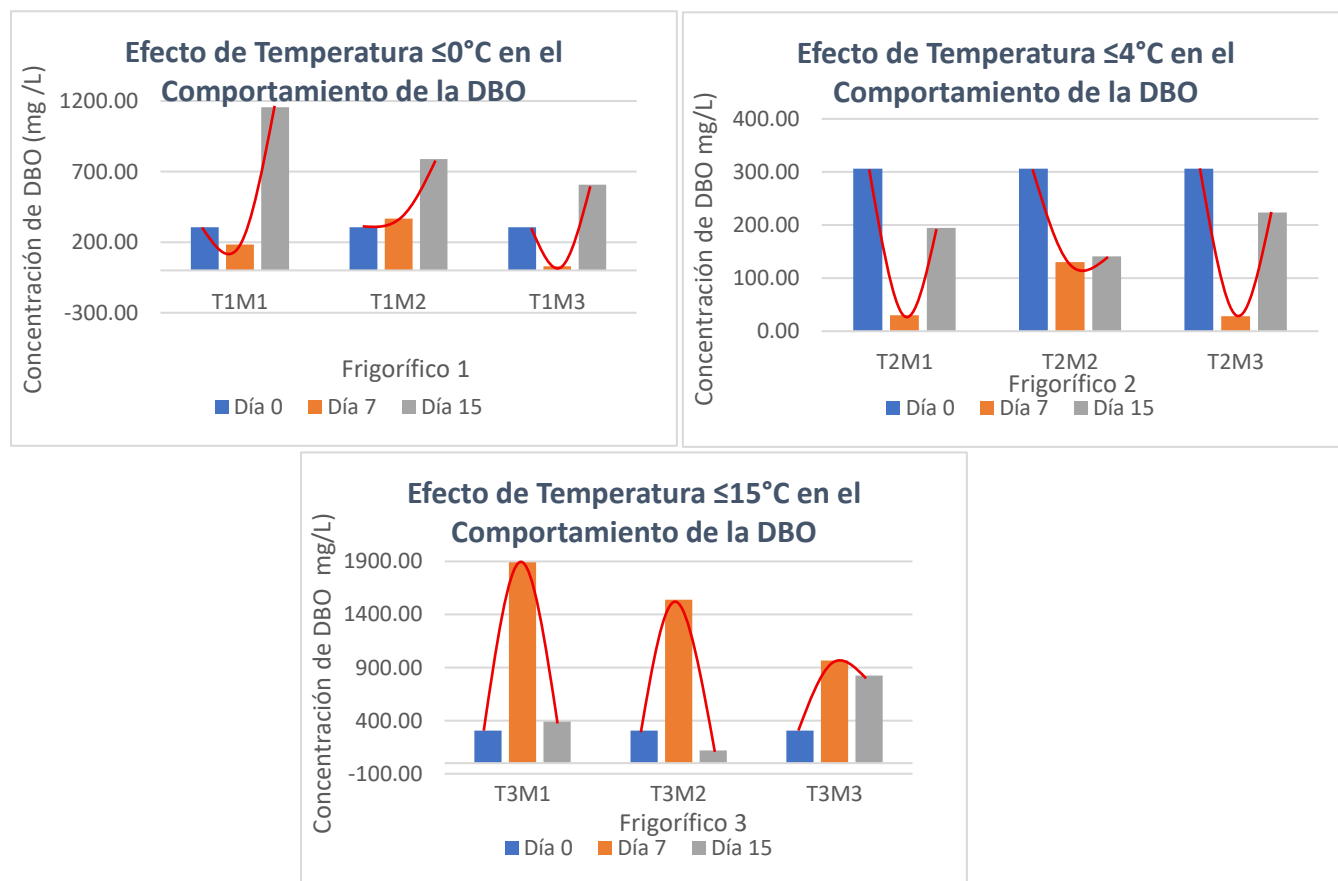
Comportamiento de los resultados analíticos de DBO ante la variación de temperatura de conservación en muestras de suelo contaminado

Frigoríficos	Muestra	Concentración (mg O ₂ /L)				
		Día 0	Día 7	%Variación	Día 15	%Variación
Termo 1	T1M1	306.39	183.04	-40%	1155.85	277%
	T1M2	306.39	366.08	19%	787.86	157%
	T1M3	306.39	28.76	-91%	606.45	98%
Termo 2	T2M1	306.39	30.20	-90%	194.85	-36%
	T2M2	306.39	129.90	-58%	140.94	-54%
	T2M3	306.39	28.16	-91%	223.71	-27%
Termo 3	T3M1	306.39	1891.40	517%	389.69	27%
	T3M2	306.39	1539.68	403%	119.85	-61%
	T3M3	306.39	966.44	215%	826.02	170%

Elaboración propia.

Figura 11

Efecto del rango de temperatura en las concentraciones de DBO



Elaboración propia.

5.2.10. Comportamiento de la demanda química de oxígeno (DQO) ante la variación de temperatura y tiempo de conservación

“La Demanda Química de Oxígeno es una medida de la cantidad de oxígeno consumido por la porción de materia orgánica existente en la muestra y oxidable por un agente químico oxidante fuerte” (Romero Rojas, 1999). La utilización de este indicador fisicoquímico refleja el comportamiento de la oxidación de agentes orgánicos e inorgánicos en las alícuotas analizadas, abarcando también a la DBO. En la **Tabla 26** y la **Figura 12** se resumen los datos recopilados para este parámetro, obteniendo lo siguiente:

- A temperaturas $\leq 0^{\circ}\text{C}$, se obtuvieron valores similares a los de la línea de base, con variaciones que oscilan entre -45% a -17%. Estos resultados se presentan gráficamente como curvas que muestran una tendencia a la reducción dentro de los 15 días de experimentación.
- A temperaturas $\leq 4^{\circ}\text{C}$, los valores fluctuaron entre 420 mg O₂/L a 640 mg O₂/L, exponiendo un patrón de reducción en las concentraciones de la DQO en comparación con la línea de base, reflejando concentraciones que son congruentes entre sí con las muestras almacenadas a esta temperatura.
- A temperaturas $\leq 15^{\circ}\text{C}$, se observó un incremento de la DQO, con valores que variaron entre 1000 mg O₂/L a 3560 mg O₂/L, indicando una tendencia al aumento de las concentraciones en este rango de temperatura.

Tabla 26

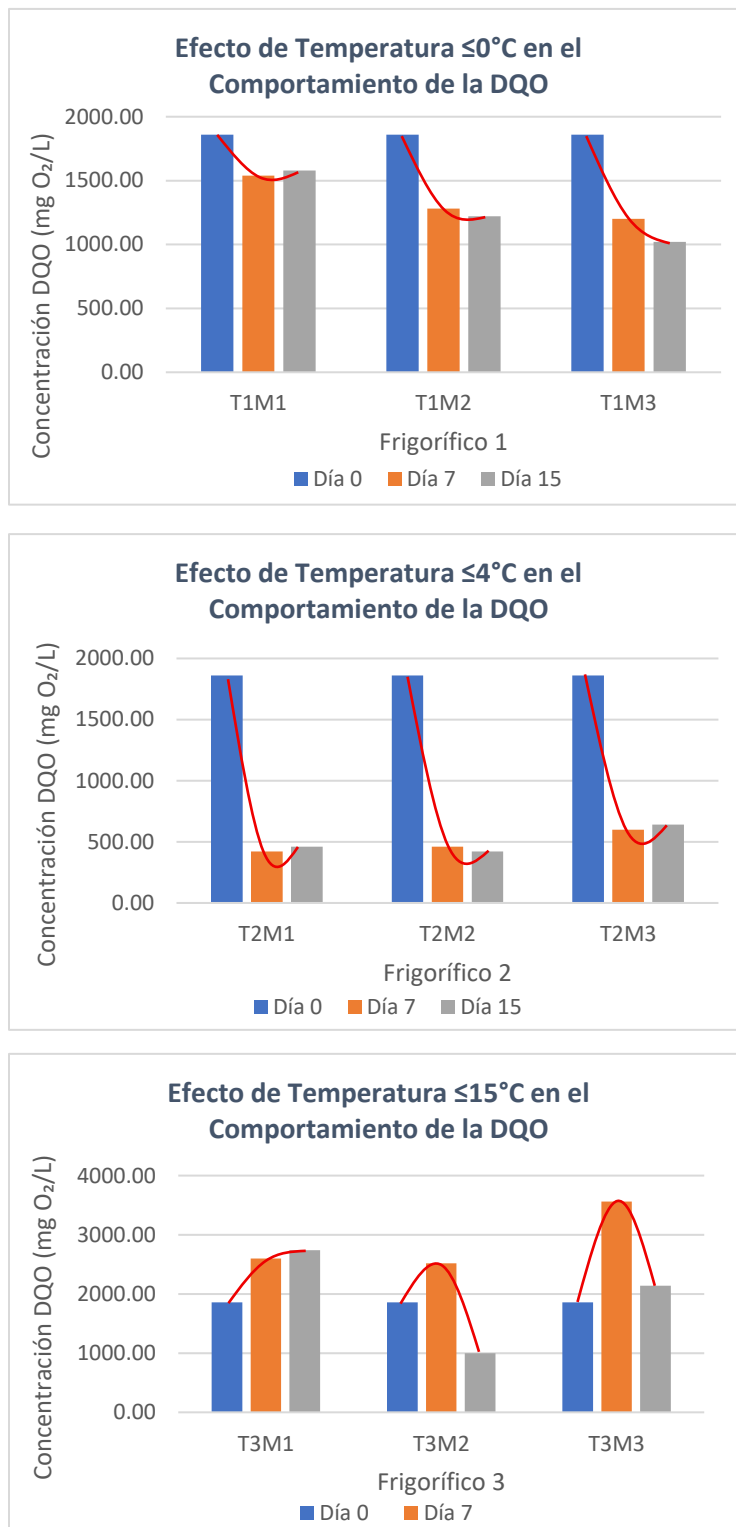
Comportamiento de los resultados analíticos de DQO ante la variación de temperatura de conservación en muestras de suelo contaminado

Frigoríficos	Muestra	Concentración (mg/L)				
		Día 0	Día 7	%Variación	Día 15	%Variación
Termo 1	T1M1	1860.00	1540.00	-17%	1580.00	-15%
	T1M2	1860.00	1280.00	-31%	1220.00	-34%
	T1M3	1860.00	1200.00	-35%	1020.00	-45%
Termo 2	T2M1	1860.00	420.00	-77%	460.00	-75%
	T2M2	1860.00	460.00	-75%	420.00	-77%
	T2M3	1860.00	600.00	-68%	640.00	-66%
Termo 3	T3M1	1860.00	2600.00	40%	2740.00	47%
	T3M2	1860.00	2520.00	35%	1000.00	-46%
	T3M3	1860.00	3560.00	91%	2140.00	15%

Elaboración propia.

Figura 12

Efecto del rango de temperatura en las concentraciones de DQO



Elaboración propia.

5.2.11. Comportamiento del oxígeno disuelto (OD) ante la variación de temperatura y tiempo de conservación

Las concentraciones de oxígeno disuelto (OD) están relacionadas con la temperatura, así como con las concentraciones de la DBO y la DQO. Según el manual de Calidad de Agua, “Las concentraciones de OD son variables y tienden a ser bajas en el agua, dependiendo de la cantidad y estabilidad de la materia orgánica; estas concentraciones disminuyen a medida que aumenta la temperatura” (Romero Rojas, 1999). En la **Tabla 27** y la **Figura 13** se presenta el comportamiento de los resultados analíticos del OD:

- A temperaturas $\leq 0^{\circ}\text{C}$, las concentraciones de OD varían entre 8.86 mg O₂/L a 15.50 mg O₂/L, reflejando un aumento de hasta el 60%. Gráficamente, se observa una tendencia de reducción en los primeros 7 días, seguida de un aumento que se representa mediante una parábola cóncava hacia arriba.
- A temperaturas $\leq 4^{\circ}\text{C}$, se registran valores y coherentes, cercanos y similares a los de la línea de base en el día 0. Gráficamente, los valores presentan variaciones entre el -8% y 17%
- A temperaturas $\leq 15^{\circ}\text{C}$, las variaciones fluctúan entre -25% y 19%, lo que indica una tendencia no específica en el comportamiento de este indicador. Esta variabilidad se debe a la presencia de un rango de temperatura más alto en este estudio, así como a las características de la muestra y a la presencia del contaminante.

Tabla 27

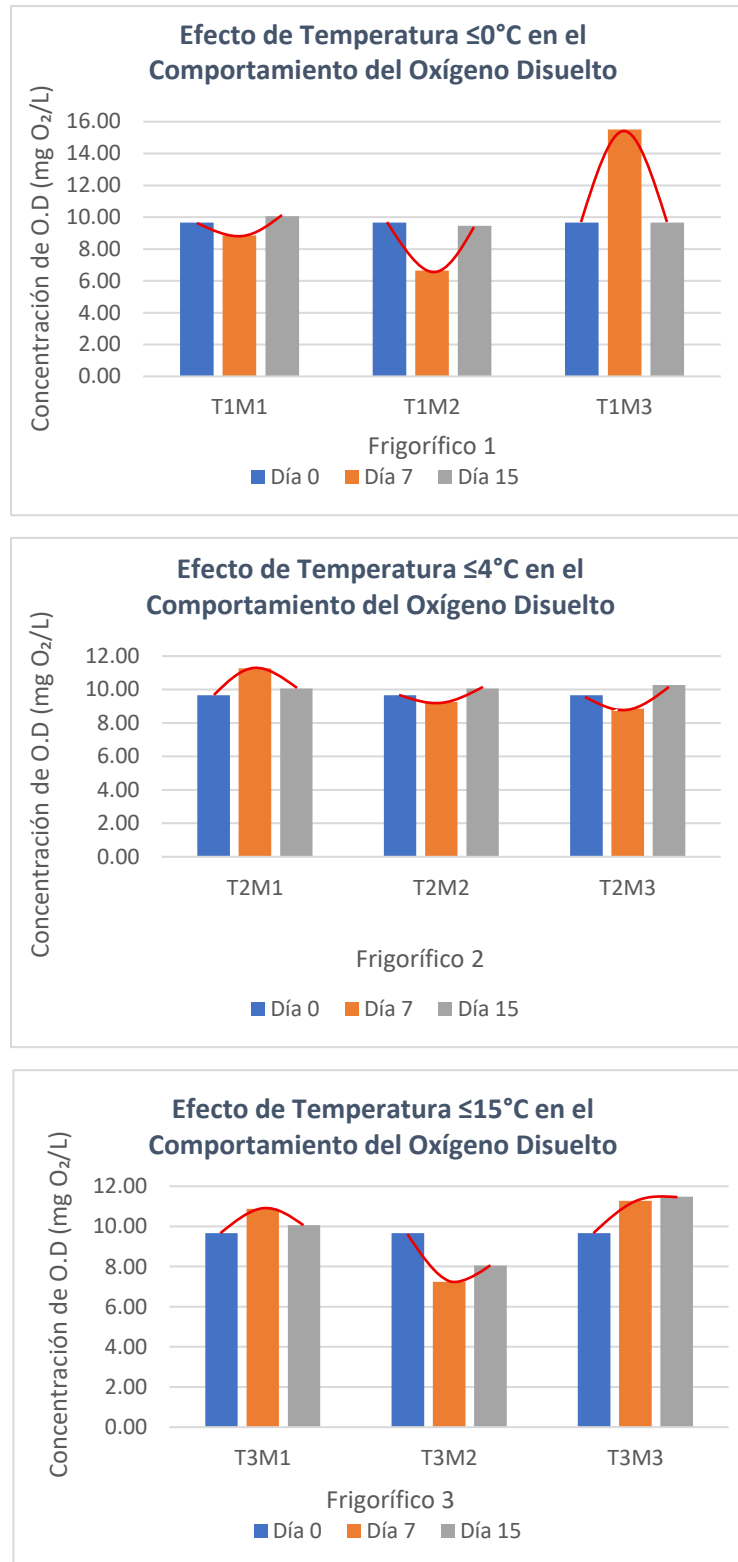
Comportamiento de los resultados analíticos de oxígeno disuelto (OD) ante la variación de temperatura de conservación en muestras de suelo contaminado

Frigoríficos	Muestra	Concentración (mg/L)				
		Día 0	Día 7	%Variación	Día 15	%Variación
Termo 1	T1M1	9.66	8.86	-8%	10.07	4%
	T1M2	9.66	6.64	-31%	9.46	-2%
	T1M3	9.66	15.50	60%	9.66	0%
Termo 2	T2M1	9.66	11.28	17%	10.07	4%
	T2M2	9.66	9.26	-4%	10.07	4%
	T2M3	9.66	8.86	-8%	10.27	6%
Termo 3	T3M1	9.66	10.87	13%	10.07	4%
	T3M2	9.66	7.25	-25%	8.05	-17%
	T3M3	9.66	11.28	17%	11.48	19%

Elaboración propia.

Figura 13

Efecto del rango de temperatura en las concentraciones de oxígeno disuelto (OD)



Elaboración propia.

5.3. Determinación de condiciones óptimas de conservación de muestras de suelo contaminado con TPH-DRO

Para atender el tercer objetivo específico, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) de dos vías con replicación. Este apartado presenta los resultados estadísticos y su interpretación, lo cual permitió establecer las condiciones óptimas de preservación que minimizan la perturbación de los indicadores fisicoquímicos.

5.3.1. Análisis de varianza de los resultados analíticos de TPH en relación con la variación de la temperatura y tiempo de conservación en muestras de suelo contaminado

Para evaluar el efecto de la temperatura y el tiempo sobre la concentración de hidrocarburos en el rango orgánico del diésel (TPH-DRO) en suelos contaminados (**Hipótesis planteada en el acápite 4.1.5**), se aplicó un análisis de varianza de dos vías con replicación (ANOVA), utilizando como factores las temperaturas de 0, 4 y 15 °C y los tiempos de análisis correspondientes a los días 7 y 15 posteriores a la contaminación. El análisis se realizó con un nivel de confianza del 95 %. La **tabla 28** muestra la distribución de la variable respuesta y los factores utilizados para aplicación del análisis de datos mediante las herramientas estadísticas de MS Excel.

Tabla 28

Distribución de los factores para tratamiento estadístico de los resultados de TPH

ID Muestra	Tratamientos	A	B
	Temperatura	Día 7	Día 15
T1M1 / TPH	0°C	9412.53	4281.95
T1M2 / TPH	0°C	9308.51	4958.68
T1M3 / TPH	0°C	9615.38	4287.6
T2M1 / TPH	4°C	9803.92	9900.99
T2M2 / TPH	4°C	9966.92	9966.78
T2M3 / TPH	4°C	9803.92	9868.42
T3M1 / TPH	15°C	9505.08	5649.72
T3M2 / TPH	15°C	8524.59	8138.02
T3M3 / TPH	15°C	9430.89	8245.38

Elaboración propia.

Una vez ingresados los datos, la herramienta generó un análisis descriptivo de los factores evaluados. En este análisis se incluyen las cantidades de muestras analizadas (clasificadas por temperatura y tiempo de conservación), los promedios de las concentraciones obtenidas en cada nivel y la varianza calculada para ambos factores. Los datos generados son presentados en la **Tabla 29**.

Tabla 29

Análisis descriptivo de las estadísticas relacionadas con los factores evaluados

SUMMARY	Día 7	Día 15	Total
0°C			
Count	3	3	6
Sum	28336.42	13528.23	41864.65
Average	9445.47333	4509.41	6977.44167
Variance	24356.2466	151390.63	7379715.12
4°C			
Count	3	3	6
Sum	29574.76	29736.19	59310.95
Average	9858.25333	9912.06333	9885.15833
Variance	8856.33333	2510.63643	5415.44274
15°C			
Count	3	3	6
Sum	27460.56	22033.12	49493.68
Average	9153.52	7344.37333	8248.94667
Variance	298040.748	2156768.98	1963827.39
Total			
Count	9		9
Sum	85371.74		65297.54
Average	9485.74889		7255.28222
Variance	176847.475		6055006.57

Elaboración propia.

Para comparar las varianzas de las muestras analizadas a 0°C, 4°C y 15°C en los tres frigoríficos, se realizó una prueba F de Fisher mediante la herramienta de Análisis de Datos de Excel. La **Tabla 30** resume los resultados del ANOVA, mostrando el estadístico F, su valor crítico y el valor P correspondiente.

Tabla 30

Resultados del análisis de varianza (ANOVA) de las concentraciones de TPH obtenidas

ANOVA						
Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Sample (Temperatura)	25497459.6	2	12748729.8	28.9532897	2.5585E-05	3.88529383
Columns (Dia)	22387417	1	22387417	50.8434472	1.1961E-05	4.74722535
Interaction (Temp-dia)	19073525.6	2	9536762.82	21.6586798	0.00010421	3.88529383
Within	5283847.15	12	440320.596			
Total	72242249.4	17				

Elaboración propia.

Los resultados de la **Tabla 30** indican que tanto la temperatura como el tiempo ejercen una influencia estadísticamente significativa sobre la concentración de TPH-DRO en el suelo ($p < 0.05$). En particular, el efecto de la temperatura presentó un valor de $F = 28.95$ con un p -valor = 2.56×10^{-5} , mientras que el efecto del tiempo arrojó un $F = 50.84$ y p -valor = 1.20×10^{-5} . Asimismo, se evidenció una interacción significativa entre ambos factores ($F = 21.66$, $p = 0.0001$), lo que sugiere que el comportamiento de la concentración de hidrocarburos a lo largo del tiempo difiere dependiendo de la temperatura aplicada.

El valor de la media cuadrática del error (MS dentro) fue de 440,320.60, lo cual representa únicamente el 7.3 % de la variabilidad total, indicando que la mayor parte de la variabilidad observada en los datos fue explicada por los factores evaluados. Este resultado respalda la calidad del experimento y refuerza la validez de los efectos detectados.

En conjunto, los datos confirman que la temperatura tiene un papel determinante en la dinámica de persistencia o degradación de los hidrocarburos tipo diésel en el suelo, probablemente debido a la influencia sobre la actividad microbiana, volatilización y otras interacciones fisicoquímicas del sistema discutidas en los apartados anteriores.

La **Figura 14** muestra la concentración promedio de hidrocarburos del rango orgánico de diésel (TPH-DRO) en suelos contaminados, evaluada en los días 7 y 15 posteriores a la contaminación, bajo tres condiciones de temperatura (0, 4 y 15 °C). Las barras representan la media de tres réplicas, con sus respectivas desviaciones estándar. Se observa una disminución significativa de la concentración a lo largo del tiempo en 0 y 15 °C mientras que a 4 °C la concentración se

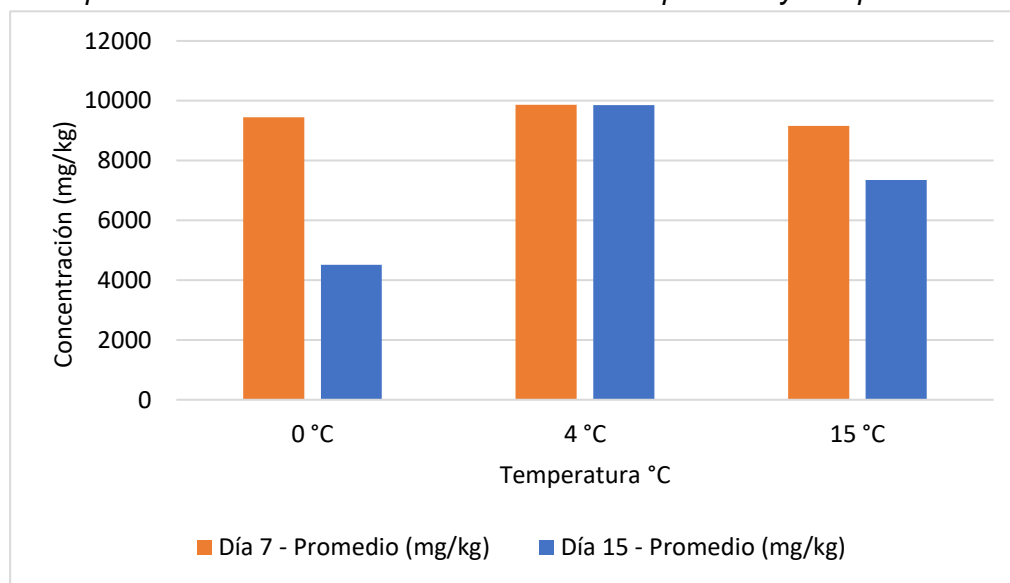
mantiene relativamente constante. Estos resultados reflejan la interacción significativa entre temperatura y tiempo observada en el análisis estadístico, además este comportamiento concuerda con estudios previos que señalan que la refrigeración a temperaturas bajas constituye una condición adecuada para minimizar la alteración de compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles en matrices de suelo contaminado (USEPA, 2016; Gómez & Roldán, 2020).

Como conclusión de la prueba aplicada, se acepta la hipótesis de investigación (H_0), estableciendo que la concentración de hidrocarburos del rango orgánico de diésel (TPH-DRO) en suelos contaminados varía con la temperatura debido a su influencia en la perturbación de los indicadores fisicoquímicos relacionados con la presencia de hidrocarburos.

Por lo tanto, el análisis estadístico demostró que las condiciones de refrigeración de 4 °C tanto en el día 7 y 15 son las más adecuadas para conservar las muestras de suelo contaminadas con TPH-DRO, ya que minimizan la perturbación de las concentraciones registradas.

Figura 14

Concentración promedio de TPH-DRO en función de la temperatura y tiempo de conservación



Elaboración propia.

VI. Conclusiones

- Se logró determinar las concentraciones de los siete indicadores fisicoquímicos en las muestras de suelo contaminado, reflejando que las concentraciones de TPH-DRO variaron entre 4,281.95 mg/kg y 9,966.62 mg/kg, el pH osciló entre 6.30 y 8.50, la conductividad eléctrica se situó entre 23.65 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 65.60 $\mu\text{S}/\text{cm}$, el COT reflejó concentraciones entre 10.50 mg/kg y 24.75 mg/kg, se determinó la DBO entre 28.16 mg O_2/L y 1,837.40 mg O_2/L , la DQO fluctuó entre 420 mg O_2/L y 3,560 mg O_2/L y el OD entre varió 6.64 mg O_2/L y 15.50 mg O_2/L .
- Se identificaron tendencias y patrones mediante la representación gráfica de las concentraciones de TPH e indicadores fisicoquímicos, al conservar las muestras de suelo contaminado a 0, 4 y 15 °C durante 7 y 15 días donde se observaron comportamientos similares en las muestras conservadas a las mismas temperaturas, lo cual valida la reproductibilidad del experimento.
- Se estableció que las condiciones óptimas de conservación de las muestras de suelo contaminado con TPH-DRO corresponden a temperaturas no mayores a 4 °C y dentro de los primeros 7 días de almacenamiento, ya que en este rango se minimiza la perturbación de los indicadores fisicoquímicos. A 15 °C se observaron alteraciones más marcadas, comprometiendo la representatividad de los resultados, lo cual se confirmó mediante un ANOVA de dos vías con replicación, que mostró un efecto estadísticamente significativo ($p < 0.05$) de la interacción entre temperatura y tiempo de conservación sobre el contenido de TPH-DRO.

VII. Recomendaciones

Para dar continuidad a la línea de investigación y apoyar los futuros trabajos que realicen los estudiantes de la Universidad Nacional de Ingeniería, así como el personal técnico de las instituciones dedicadas al estudio de agua y suelo contaminado por hidrocarburos, se recomienda lo siguiente:

- Realizar estudios similares que analicen la influencia de la temperatura en muestras de suelo y/o agua que contengan las fracciones de hidrocarburos ligeras y pesadas mediante los rangos de TPH-GRO/DRO y otros compuestos derivados del petróleo.
- Utilizar los métodos cromatográficos sugeridos por la EPA (U.S. Environmental Protection Agency), específicamente el método 8015, para la determinación de las cadenas carbonadas de hidrocarburos TPH-GRO/DRO/ORO. Esto permitirá obtener un mayor conocimiento de la composición específica del contaminante, facilitando una evaluación más precisa del impacto en las matrices muestreadas.
- Analizar el comportamiento biológico y su relación con las variaciones de temperatura en muestras de suelo contaminadas con los rangos TPH-GRO/DRO/ORO, con el fin de entender como las condiciones térmicas de almacenamiento afectan la actividad microbiológica presente en los procesos de biodegradación y atenuación natural.

VIII. Bibliografía

- Ander Egg, E. (2011). *Aprender a Investigar: Nociones Básicas para la Investigación Social* (Primera). Editorial Brujas.
- Arias, J. A. V. (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.
- Astier-Calderón, M., Maass-Moreno, M., & Etchevers-Barra, J. (2002). Derivación de indicadores de calidad de suelos en el contexto de la agricultura sustentable. *Agrociencia*, 36(5), 605-620.
- Bendaña García, G. (2022). Los Suelos de Nicaragua: Génesis, propiedades, clasificaciones, degradación y recuperación.
- Brady, N. C., & Weil, R. R. (2017). *The nature and properties of soils* (15th ed.). Pearson.
- Calderón Gómez, S. M. (2006). Contaminación de suelos con hidrocarburos y modelos THM.
- Castañeda, M. T. (2019). Estequiometría y cinética del crecimiento microbiano.
- Centroamericano, R. T. (2006). Productos de petróleo. Aceite combustible diésel. Especificaciones. In.
- Dumitrescu, I. M. L. (2018). Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos. In *Learning Toxicology Through Open Educational*.
- Engineering & Technology, 10, 429-436. https://www.researchgate.net/profile/Saif-Salih-Al-Rawi/publication/318165966_WATER-DIESEL_EMULSION_A_REVIEW/links/595bf3720f7e9bf415b4a4dd/WATER-DIESEL-EMULSION-A-REVIEW.pdf
- FERTILAB. (s.f.). *El Manejo de Suelos Alcalinos*.
- Gómez, P., & Roldán, F. (2020). *Efecto de la refrigeración en la preservación de hidrocarburos volátiles y semivolátiles en suelos contaminados*. *Revista Latinoamericana de Ciencias Ambientales*, 15(2), 45–58.
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, M. (2014). *Metodología de la Investigación* (Sexta). McGraw - Hill.

- IHOBE, S. d. G. (2002). Manual práctico para la investigación de la contaminación del suelo. Gobierno Vasco.
- INE, I. N. d. E. (2024). Base de Datos Agentes Económicos a Nivel Nacional. In.
- INSTRUMENTS, H. (s.f.). Conductividad y sólidos disueltos. Hanna instruments Catalogar. <https://www.hannainst.es/blog/79/conductividad-y-solidos-disueltos>
- INTERTEK. (s.f.). Ensayos de la concentración de TPH en muestras contaminadas de agua y suelos por hidrocarburos.
- Kalbitz, K., Schwesig, D., Schmerwitz, J., Kaiser, K., Haumaier, L., Glaser, B., & Matzner, E. (2003). Changes in properties of dissolved organic matter induced by biodegradation. *Soil Biology and Biochemistry*, 35(8), 1129–1142. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(03\)00165-2](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(03)00165-2)
- Leahy, J. G., & Colwell, R. R. (1990). Microbial degradation of hydrocarbons in the environment. *Microbiological Reviews*, 54(3), 305–315. <https://doi.org/10.1128/mmbr.54.3.305-315.1990>
- Lecca, E. R., & Lizama, E. C. R. (2014). Caracterización de las aguas residuales y la demanda bioquímica de oxígeno. *Industrial data*, 17(1), 71-80.
- Lerena Villalpando, F. A. (2023, octubre 2023). La Importancia de la Textura de los Suelos Agrícolas Bajo Riego en el Proceso de Ensalitramiento Indirecto y en la Rehabilitación de Suelos Salinizados o Sodificados VIII Congreso Nacional y I Congreso Internacional de Riego, Drenaje y Biosistemas, Saltillo, Coahuila, México.
- Ley No. 277 "Ley de Suministro de Hidrocarburos", (1998).
- López, R. R., & Pérez, I. H. (2019). Diseño de reactores homogéneos. Cengage Learning.
- Ministerio de Energía y Minas. (2023). Anuario estadístico de hidrocarburos – 2022.
- Muskus, A. M. S., C. (2014). Influence of diesel's variation in the bioventing. *Entre Ciencia e Ingeniería*.
- NOM-138-SEMARNAT/SS-2003, SEMARNAT (2004).
- Pérez, E. S. M. S. E. (2024). Evaluación de la demanda de peróxido de hidrógeno en la reacción Fenton para remediar suelo contaminado artificialmente con hidrocarburo, San Benito, abril-junio 2024 UNAN-Managua]. MARENA.

- Rice, E. W., Bridgewater, L., & Association, A. P. H. (2012). Standard methods for the examination of water and wastewater (Vol. 10). American public health association Washington, DC.
- Ritoré, E. (2021). Desarrollo de tecnologías de recuperación de subsuelos contaminados por hidrocarburos derivados del petróleo.
- Rodríguez, J. M. S. (2008). *Manual de lucha contra la contaminación por hidrocarburos*. Servicio Publicaciones UCA.
- Romero Rojas, J. A. (1999). Calidad del Agua, Segunda Edición.
- s.a. (2009). Materiales de Construcción - Tamaño de las partículas de Suelo. Universidad José Cecilio del Valle. <https://matdeconstruccion.wordpress.com/2009/08/29/tamano-de-las-particulas-de-suelo/>
- Salih, S. Y. (2017). Water-diesel emulsion: a review. International Journal of Advances in
- Siegrist, R. L., Crimi, M., & Simpkin, T. J. (2011). In situ chemical oxidation for groundwater remediation (Vol. 3). Springer Science & Business Media.
- Torrez, J. (2015). Tecnologías de remediación para suelos contaminados. Instituto Nacional de Ecología.
- USEPA. (2016). *Preservation and storage of soil samples for organic contaminants analysis*. U.S. Environmental Protection Agency.
- Velázquez, M., Ortega, M., Martínez, A., Kohashi, J., & García, N. (2002). Relación funcional PSI-RAS en las aguas residuales y suelos del Valle del Mezquital, Hidalgo, México. *Terra Latinoamericana*, 20(4), 459-464.
- Whyte, L. G., Hawari, J., Zhou, E., Bourbonniere, L., Inniss, W. E., & Greer, C. W. (1998). Biodegradation of variable-chain-length alkanes at low temperatures by a psychrotrophic *Rhodococcus* sp. *Applied and Environmental Microbiology*, 64(7), 2578–2584. <https://doi.org/10.1128/AEM.64.7.2578-2584.1998>

IX. Anexos

Anexo 1. Materiales a utilizar en la experimentación.

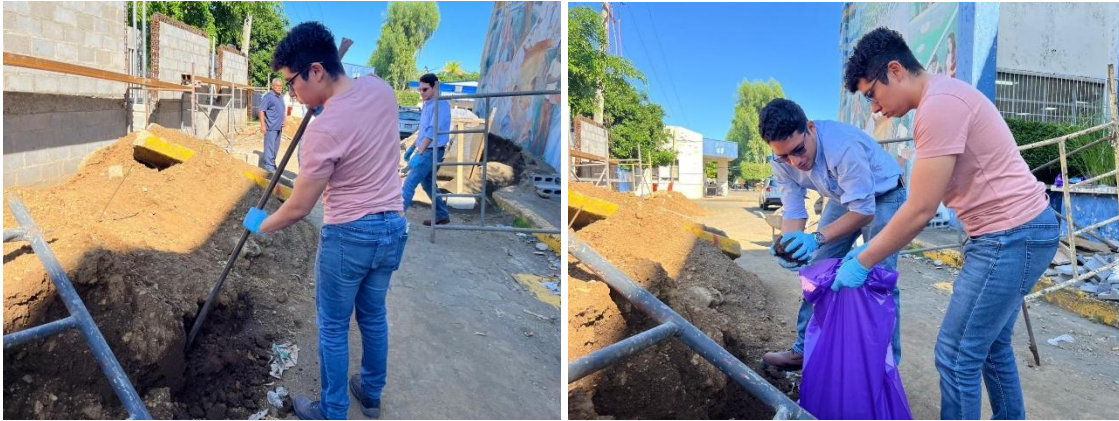
Método	Materiales y equipos	Figura
Obtención de la muestra de suelo	Materiales: Recipientes de vidrio para muestreo Bolsa con cierre hermético (Ziploc) Termómetro Atomizador Guantes de nitrilo Plástico burbuja Cinta adhesiva 10 kg de suelo	
Tratamiento preliminar de la materia prima	Tamizado Herramientas: Balanza, tamices. Caracterización granulométrica Especificaciones: Agitador de tamices Ro-tap RX29 Oscilador por min: 278 ± 10 Desplaza. por Oscilaciones: $1\text{-}1/8$ pulg x $7/16$ pulg Toques por min: 150 ± 10 Temperatura de secado: $<160^{\circ}\text{C}$ Dimensiones: 71 cm x 54 cm x 64 cm Alimentación: $\sim 220\text{V}$ 50Hz 130VA Peso: 180 lb (82Kg)	
Preparación del analito de interés	Centrifugación: Especificaciones Marca: Fisher Scientific; modelo centrifug: 225 Fuente de alimentación: 110 V CC; 5 A Altura: 14 pulg Longitud: 20 pulg Capacidad: 360 mL Fuerza máxima: 5100 rpm/ 3400 x G	

Método	Materiales y equipos	Figura
Evaluación del pH por 4500 H ⁺ B. y conductividad por 2510 B	Método electrométrico Especificaciones. Modelo PHMETRO THERMO SCIENTIFIC - STARA2145 ORI Rango pH: -2 a 20 Exactitud relativa: ±0.002 Electrodo pH: BNC, pin de referencia Sonda ATC: mini-DIN 8 pines Brazo de electrodo con soporte rediseñado Adaptador de corriente universal	
Análisis de Oxígeno disuelto por 4500-O	Método de electrodo de membrana Especificaciones Modelo: HI98198 (OPDO) Sonda: OD óptica HI764113 oxígeno zero: HI7040 (230 ml + 30 ml)	
Análisis de DBO por método Winkler	Materiales Balones de afloración, botellas Winker, pipetas volumétricas, peras de succión, probetas, buretas, agitadores magnéticos, Erlenmeyers soporte universal	
	Reactivos Soluciones de nitrógeno, magnesio, fósforo y calcio sulfato manganoso, álcali yoduro azida, y ácido sulfúrico concentrado	
Análisis de DQO por método de digestión con reactor	Reactivos Agua desionizada 4L Seleccione la gama de tubos DQO adecuada: Tubos DQO gama baja 0-150 mg/l Tubos DQO gama alta 0-1.500 mg/l Tubos DQO gama alta plus 0-15.000 mg/l	
	Accesorios Adaptador para tubo DCO, DR/2010 Mezclador 1,2 litros, 120 V, 50/60 Hz Mezclador 1,2 litros, 120 V, 50/60 Hz Herramienta para tapón de tubo DQO Pipeta volumétrica clase A, 2,00 ml Pipeta TenSette 0,1 a 1,0 ml, Pipeteador Soporte para tubos DQO, Reactor COD 230 V (Europa), Reactor COD 115/230 V 50/60 Hz, USA/Canadá)	

Método	Materiales y equipos	Figura
Análisis de Hidrocarburo totales por método gravimétrico	Materiales Soporte universal Papel filtro Beakers Balones de destilación Manta de calefacción / rotavapor Reactivos Hexano Na_2SO_4.	
Análisis de Carbono orgánico total por método volumétrico	Materiales Balanza analítica Erlenmeyer Balones de afloración Pipetas volumétricas Peras de succión Agitadores magnéticos Soporte universal Bureta Reactivos $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 1N H_2SO_4 concentrado $(\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4) \cdot 6\text{H}_2\text{O})$ Fenantrolina	

Nota: Elaboración propia.

Anexo 2. Ubicación y colecta de muestra de suelo



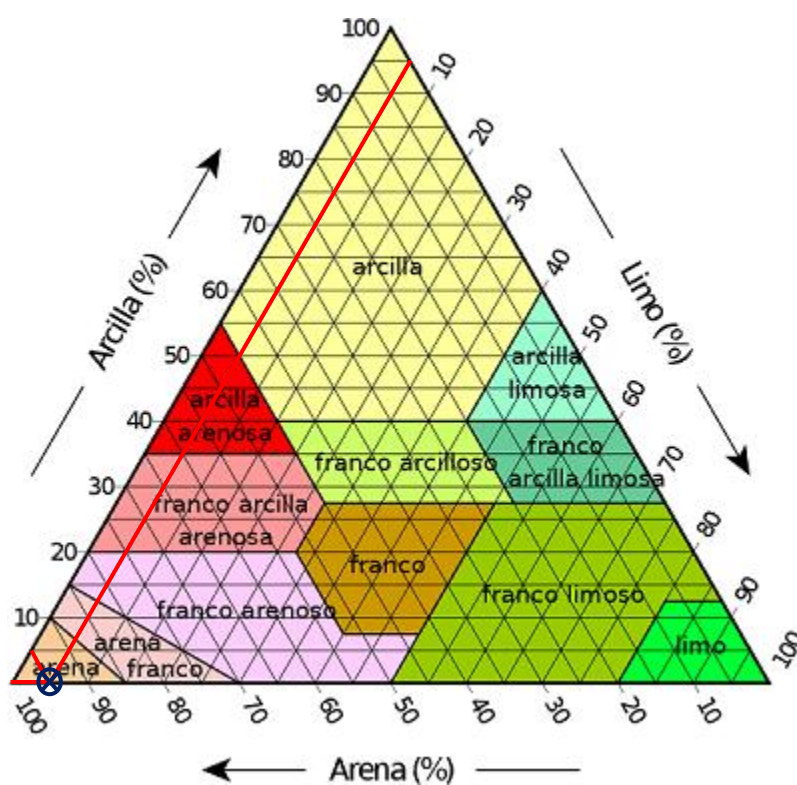
Anexo 3. Determinación de la densidad aparente



Anexo 4. Preparación de muestras contaminadas por diésel



Anexo 5. Determinación de la textura del suelo



Anexo 6. Muestras de 0°C, 4°C y 15°C previo al análisis



Anexo 7. Análisis de TPH



Anexo 8. Análisis de pH y conductividad



Anexo 9. Análisis de COT

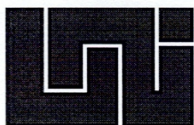


Anexo 10. Análisis de DBO, DQO y OD



Anexo 11. Experimentación





UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE REGISTRO ACADÉMICO

HOJA DE MATRICULA
AÑO ACADEMICO 2025

No. Recibo

No. Inscripción **2225**

NOMBRES Y APELLIDOS: Aarón David Navarro Ulloa

CARRERA: INGENIERÍA QUÍMICA

CARNET: 2020-0832U

TURNO: Diurno

PLAN DE ESTUDIO: 2015

SEMESTRE: SEGUNDO SEMESTRE
2025

FECHA: 22/07/2025

No.	ASIGNATURA	GRUPO	AULA	CRED.	F	R
1	ULTIMA LINEA					

F:Frecuencia de Inscripciones de Asignatura R: Retiro de Asignatura

USER_ONLINE

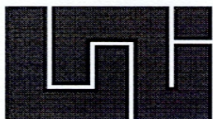
GRABADOR

cc:ORIGINAL:ESTUDIANTE - COPIA:EXPEDIENTE.

IMPRESO POR SISTEMA DE REGISTRO ACADEMICO EL 05-ago.-2025

FIRMA Y SELLO DEL
FUNCIONARIO

FIRMA DEL
ESTUDIANTE



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE REGISTRO ACADÉMICO

HOJA DE MATRICULA
AÑO ACADEMICO 2025

No. Recibo		No. Inscripción 1505				
NOMBRES Y APELLIDOS: Adiac León Canales Matute						
CARRERA: INGENIERÍA QUÍMICA		CARNET: 2018-0947U		TURNO: Diurno		
PLAN DE ESTUDIO: 2015		SEMESTRE: SEGUNDO SEMESTRE 2025		FECHA: 22/07/2025		
No.	ASIGNATURA	GRUPO	AULA	CRED.	F	R
1	ULTIMA LINEA					

F:Frecuencia de Inscripciones de Asignatura R: Retiro de Asignatura.

USER_ONLINE

GRABADOR

cc:ORIGINAL:ESTUDIANTE - COPIA:EXPEDIENTE.

IMPRESO POR SISTEMA DE REGISTRO ACADEMICO EL 05-ago.-2025

FIRMA Y SELLO DEL
FUNCIONARIO

FIRMA DEL
ESTUDIANTE



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
AREA DE CONOCIMIENTO DE AGRICULTURA**

SECRETARIA DE ÁREA ACADÉMICA

F-8: CARTA DE FINALIZADO PLAN DE ASIGNATURA

El Suscrito Secretario del **ÁREA DEL CONOCIMIENTO DE AGRICULTURA** hace constar que:

NAVARRO ULLOA AARÓN DAVID

Carné: **2020-0832U** Turno: **Diurno** Plan de Asignatura: **2015** de conformidad con el Reglamento Académico vigente en la Universidad, ha aprobado todas las asignaturas correspondientes a la carrera de **INGENIERÍA QUÍMICA**, en el año 2024 y solo tiene pendiente la realización de una de las formas de culminación de estudio.

Se extiende la presente **CARTA DE FINALIZADO PLAN DE ASIGNATURA**, a solicitud del interesado en la ciudad de Managua, a los veinte y nueve días del mes de enero del año dos mil veinte y cinco.

Atentamente,



Helia Vanessa Taleno Oporta
SECRETARIO DE ÁREA ACADÉMICA



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
AREA DE CONOCIMIENTO DE AGRICULTURA**

SECRETARIA DE ÁREA ACADÉMICA

F-8: CARTA DE FINALIZADO PLAN DE ASIGNATURA

El Suscrito Secretario del **ÁREA DEL CONOCIMIENTO DE AGRICULTURA** hace constar que:

CANALES MATUTE ADIAC LEÓN

Carné: **2018-0947U** Turno: **Diurno** Plan de Asignatura: **2015** de conformidad con el Reglamento Académico vigente en la Universidad, ha aprobado todas las asignaturas correspondientes a la carrera de **INGENIERÍA QUÍMICA**, en el año 2024 y solo tiene pendiente la realización de una de las formas de culminación de estudio.

Se extiende la presente **CARTA DE FINALIZADO PLAN DE ASIGNATURA**, a solicitud del interesado en la ciudad de Managua, a los veinte y nueve días del mes de enero del año dos mil veinte y cinco.

Atentamente,



Helia Vanessa Taleno Oporta
SECRETARIO DE ÁREA ACADÉMICA