POLITECNICO DI TORINO
Repository ISTITUZIONALE

Despliegue de la función calidad para determinar los requisitos de diseño en biopilas experimentales a escala de banco, evaluadas como alternativa resiliente para la

Original
Despliegue de la función calidad para determinar los requisitos de diseño en biopilas experimentales a escala de banco, evaluadas como alternativa resiliente para la degradación de residuos petrolizados / Castro Rodriguez, David Javier; Jiménez González, Yudexi; Gutiérrez Benítez, Omar; Viera Ribot, Orlando Manuel; Rabassa Rabassa, Dayana; Casals Pérez, Enmanuel; Demichela, Micaela. - In: INGENIARE. REVISTA CHILENA DE INGENIERÍA. - ISSN 0718-3305. - ELETTRONICO. - 30:3(2022), pp. 439-454. [10.4067/S0718-33052022000300439]

Availability:
This version is available at: 11583/2973076 since: 2022-11-15T09:27:39Z

Publisher:
Revista de la Facultad de Ingeniería - Universidad de Tarapacá, Chile

Published
DOI:10.4067/S0718-33052022000300439

Terms of use:

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

Publisher copyright

(Article begins on next page)

22 September 2024

Despliegue de la función calidad para determinar los requisitos de diseño en biopilas experimentales a escala de banco, evaluadas como alternativa resiliente para la degradación de residuos petrolizados

Quality function deployment to determine the design requirements in experimental biopiles at bench-scale, evaluated as a resilient strategy for the degradation of oily waste

David Javier Castro Rodríguez[1]* Yudexi Jiménez González[2]
Omar Gutiérrez Benítez[3] Orlando Manuel Viera Ribot[2]
Dayana Rabassa Rabassa[4] Enmanuel Casals Pérez[2] Micaela Demichela[1]

Recibido 03 de febrero de 2021, aceptado 05 de mayo de 2022
Received: February 03, 2021 Accepted: May 05, 2022

RESUMEN

Debido al aumento en la cantidad de petróleo utilizado, grandes cantidades de hidrocarburos se liberan anualmente al medio ambiente, constituyendo una de las principales causas de contaminación del suelo a nivel mundial. El Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos, Cuba, ejecutó un proyecto experimental para desarrollar una técnica innovadora que aumentase la resiliencia territorial, ante dicho problema ambiental. El objetivo fue implementar el Despliegue de la Función Calidad (QFD), para determinar los requisitos de diseño de las unidades experimentales a evaluar a escala de banco, durante la degradación de residuos petrolizados mediante diferentes tratamientos de la ecotecnología de biopilas. Se implementó un enfoque de 4 etapas que permitió organizar el equipo, seleccionar la tecnología, adoptar un procedimiento para la implementación del QFD para traducir las necesidades en requisitos de ingeniería y diseminar los resultados. Las concentraciones de microorganismos, nutrientes y de hidrocarburos en la biopila, fueron las características que acumularon más del 50% de los pesos relativos de la matriz de primer nivel. Concentración inicial de hidrocarburos y los porcentajes de humedad y de texturizantes en la mezcla, obtuvieron los mayores pesos relativos en el segundo nivel. El porcentaje de texturizantes en la mezcla de la biopila se identificó como una oportunidad de reducir los costos y de mejoría en la eficacia de la biorremediación. Los resultados y lecciones aprendidas propiciaron delinear los protocolos experimentales para el diseño ingeniero y permitieron construir un prototipo a escala de banco de las biopilas experimentales para la evaluación de diversos tratamientos.

Palabras clave: Biopilas, características, requisitos, resiliencia, residuos petrolizados, QFD, texturizantes, tratamientos, unidades experimentales.

[1] Politecnico di Torino (POLITO). Dipartimento Scienza Applicata e Tecnologia (DISAT). Torino, Italia.
E-mail: david.castro@polito.it; micaela.demichela@polito.it
[2] Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos. Departamento de Gestión e Ingeniería Ambiental. Cienfuegos, Cuba.
E-mail: yudexi@ceac.cu; orlandoribot1987@gmail.com; ecperez@gestion.ceac.cu
[3] Universidad de Cienfuegos Carlos Rafael Rodríguez. Departamento de Ingeniería Química. Cienfuegos, Cuba.
E-mail: ogutierrez@ucf.edu.cu
[4] Universidad de Sonora. Departmento de Ingeniería Química y Metalúrgica. Hermosillo, Sonora, México.
E-mail: a221230080@unison.mx
* Autor de correspondencia: david.castro@polito.it

ABSTRACT

Due to the increased amount of oil used, large volumes of hydrocarbons are released annually into the environment, constituting one of the main causes of soil pollution worldwide. The Center for Environmental Studies of Cienfuegos, Cuba, implemented an experimental project to develop an innovative technique that increases territorial resilience to this environmental problem. The goal was to implement the Quality Function Deployment (QFD) to determine the design requirements of the experimental units to evaluate at the bench-scale during the degradation of oily residues through different treatments of biopiles ecotechnology. A 4-stage approach allowed for organizing the team, selecting the technology, adopting a QFD implementation procedure to translate the needs into engineering requirements, and disseminating the results. The concentrations of microorganisms, nutrients, and hydrocarbons in the biopile were the characteristics that accumulated more than 50% of the relative weights of the first level matrix. The initial concentration of hydrocarbons and the percentages of moisture and bulking agents in the mixture obtained the highest relative weights in the second level. The percentage of bulking agents in the biopile mixture was identified as an opportunity to reduce costs and improve the effectiveness of bioremediation. The results enabled the delineation of the experimental protocols for the engineering design, which allowed to build off a bench-scale prototype of the experimental units for evaluating various treatments of biopiles ecotechnology as a resilient alternative against soil hydrocarbon pollution.

Keywords: Biopiles, characteristics, experimental units, oily residues, QFD, requirements, resilience, bulking agents, treatments.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo industrial ha traído consigo un aumento en la cantidad de petróleo utilizado [1]. Asociado a ello, grandes cantidades de hidrocarburos se liberan anualmente al medio ambiente [2, 3]. Específicamente, los hidrocarburos del petróleo son una de las principales causas de contaminación del suelo a nivel mundial [4].

Consecuentemente, los suelos contaminados con hidrocarburos presentan diferentes y graves peligros para el medio ambiente y la salud humana [3]. De una parte, la presencia de este contaminante en el suelo tiene consecuencias perjudiciales para el ecosistema en general, ya que posee efectos tóxicos directos que provocan cambios en las propiedades químicas y físicas del suelo, como la difusión de oxígeno o la capacidad de contenido de agua. Asimismo, este tipo de contaminación puede causar daños a los organismos vivos debido a la acumulación de contaminantes en los tejidos de animales y plantas, propiciando la muerte o mutación de estos [4]. Por otra parte, estos compuestos también representan una seria amenaza para los humanos [2], debido a su potencial genotóxico, mutagénico y carcinogénico. En ese sentido, han sido clasificados como carcinógenos humanos probables por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés), mientras que la Agencia Internacional de Investigación sobre el Cáncer (IARC, por sus siglas en inglés) los considera para la evaluación del riesgo de cáncer en sitios contaminados [5, 6].

Por su parte, la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible en su amplia visión sobre la sostenibilidad, comprende las dimensiones económica, social y ambiental. Específicamente, el objetivo 3 tiene la intención de garantizar vidas saludables y promover el bienestar para todos, en todas las edades. Dentro de este objetivo, se destaca especialmente la necesidad de reducir sustancialmente el número de muertes y enfermedades asociadas a descargas de productos químicos peligrosos y a la contaminación. Para ello, se supone fundamental lograr el manejo ambientalmente racional de los productos químicos y todos los desechos a lo largo de su ciclo de vida y una mayor adopción de tecnologías y procesos industriales limpios y ecológicos [7].

En las últimas décadas, la biorremediación se ha considerado como una técnica emergente, ecológica y sostenible debido a su simplicidad, rentabilidad [4, 8] y a la capacidad metabólica de los microorganismos para degradar los hidrocarburos de petróleo en el suelo. Básicamente,

la biorremediación puede ocurrir de forma natural (atenuación natural) o potenciarse con la introducción de nutrientes (bioestimulación) o microorganismos (bioaumentación), o bien mediante la combinación de métodos [9]. De todas las variantes la bioestimulación, que consiste en la mejora de las condiciones ambientales desde el punto de vista nutricional, ha demostrado ser una de las mejores soluciones en términos de facilidad y manejo, en comparación con los resultados obtenidos [10]. Además, la bioestimulación presenta una notable ventaja frente a otras alternativas, porque los microorganismos ya están adaptados a las condiciones del sitio [9].

La ecotecnología de biopilas está atrayendo gran interés como uno de los métodos de bioestimulación para suelos contaminados con hidrocarburos que constituye al mismo tiempo, una opción efectiva, económica y amigable al medio ambiente [11]. La biopila se define como un proceso biológico controlado donde los contaminantes orgánicos se biodegradan y mineralizan. El proceso consiste en formar pilas con el suelo contaminado, estimular la actividad microbiana, airear, agregar nutrientes y mantener la humedad [12].

La Agencia de Medio Ambiente del Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente (CITMA) de Cuba, gestiona el Programa de Ciencia, Tecnología e Innovación de Interés Nacional: "Uso sostenible de los componentes de la Diversidad Biológica en Cuba". Dentro del mismo, constituye una prioridad de cara al uso y gestión de la biodiversidad, el implementar ecotecnologías dirigidas a la aplicación de la biorremediación y al tratamiento de los principales contaminantes [13]. Por su parte, el Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos (CEAC) ha reportado antecedentes de contaminación significativa de suelos contaminados por hidrocarburos, como resultado de las operaciones de diversas instalaciones industriales de la región central del país [14, 15]. Asimismo, según la Estrategia Ambiental Territorial de Cienfuegos 2021-2030, la falta de percepción de riesgo por parte de las direcciones empresariales, respecto al inadecuado manejo de estos residuales, ha limitado la actualización de inventarios y sobre todo la solución para los residuales periódicamente confinados. Datos estadísticos reportan que en la provincia de Cienfuegos persisten lodos petrolizados confinados resultantes de la colecta a las empresas del territorio que ascienden a la cifra de 2.993 740 kg [16].

En ese contexto y bajo los objetivos del desarrollo sostenible, se desarrolló un proyecto experimental, de acrónimo BIOPILA, para la evaluación de tratamientos de la ecotecnología de biopilas en la degradación de residuos petrolizados, como técnica innovadora y resiliente ante el problema ambiental de la contaminación del suelo con hidrocarburos.

La primera de las cinco etapas del proyecto BIOPILA contempló entre otras tareas, traducir a características de ingeniería medibles las principales necesidades de las partes interesadas en el uso de la ecotecnología de biopilas. El desarrollo de dicha primera etapa se enfocó en la respuesta a la siguiente interrogante: ¿Cómo determinar los requisitos de diseño de las unidades experimentales a emplear a escala de banco, durante la biodegradación de diferentes tratamientos de la ecotecnología de biopilas, evaluados como alternativa resiliente ante la contaminación del suelo con residuos petrolizados?

En ese sentido, resultó crítico el uso de un método estructurado que permitiera ya sea identificar y priorizar los atributos de la tecnología, como ayudar a los ingenieros no familiarizados con los problemas ambientales, en el diseño de soluciones naturales o ecológicas [17]. El Despliegue de la Función Calidad (QFD, por sus siglas en inglés) es un método de planificación que ofrece un enfoque sistemático en la traducción de atributos necesarios, en características de ingeniería con vistas a satisfacer expectativas, al superar la ambigüedad existente de percepción entre clientes y el equipo de diseño [18]. El QFD ha sido extendido a disímiles productos y proyectos [19-27], sin embargo, no se encontraron antecedentes del uso de dicho método aplicado en el desarrollo de tecnologías de biorremediación de hidrocarburos. Además, se consideró necesario abordar la sostenibilidad en el diseño y los requerimientos ambientales dentro demandas de las partes interesadas [28]. Consecuentemente con la problemática descrita, y las limitantes identificadas el objetivo de la investigación consistió en implementar el QFD para determinar los requisitos de diseño de las unidades experimentales empleadas a escala de banco, durante la biodegradación de diferentes tratamientos de la ecotecnología de biopilas,

evaluados como alternativa resiliente ante la contaminación del suelo con residuos petrolizados.

MATERIALES Y MÉTODOS

Contextualización del enfoque utilizado

En esta sección, se describe el enfoque utilizado formado de cuatro etapas que permitieron: i) Organizar el trabajo, creando y capacitando el equipo para el despliegue de la función calidad; ii) Seleccionar la ecotecnología, comparando las diferentes alternativas tecnológicas; iii) Desplegar la función calidad, implementando la casa de la calidad (HoQ, por sus siglas en inglés); iv) y por último la etapa de aprendizaje, donde se concluyó sobre lo realizado y se formularon las lecciones aprendidas en aras de la diseminación de resultados y desarrollo de las siguientes etapas del proyecto. El diagrama del enfoque utilizado se muestra en la Figura 1.

La etapa I, organización del trabajo, constituyó la piedra angular del proyecto QFD, y sobre ella se sustentaron las subsiguientes etapas.

Por su parte, en la etapa II, fue fundamental la formulación del resultado deseable a través del desarrollo e innovación de la ecotecnología. En ese empeño resultaron de utilidad las siguientes interrogantes: a) ¿Qué es lo que limita el desempeño actual? b) ¿Cuál es el referencial de excelencia en el territorio? Las mismas se desarrollan por independiente a continuación:

a) ¿Qué es lo que limita el desempeño actual?

En general, la contaminación del suelo por hidrocarburos posee un origen antropogénico, debido a minería, derrames accidentales, fugas, malas prácticas o conductas ilegales en el manejo y disposición de desechos [4, 9]. En la manifestación de este problema ambiental específico inciden además múltiples factores que incluyen: i) la obsolescencia tecnológica; ii) la insuficiente introducción de prácticas de carácter preventivo orientadas a la reducción de la generación de residuales en la fuente de origen; iii) la insuficiente cobertura de tratamiento de residuales y el incumplimiento de los ciclos de reparación y mantenimiento [16].

Respecto al último factor, los separadores gravitatorios convencionales de agua e hidrocarburo constituyen un componente clave en las operaciones de tratamiento, durante la separación del aceite, la grasa, los hidrocarburos y los sedimentos de las aguas residuales dentro la industria de procesos [29]. Desafortunadamente, muchos dispositivos de separación vigentes en la industria son similares a los utilizados hace más de cien años, y en ocasiones no resultan bien instalados o mantenidos, lo que propicia que no sean eficientes en comparación con las regulaciones ambientales cada vez más exigentes [29]. Además, dichos dispositivos necesitan de un sistema mantenimiento para la eliminación de los lodos que se depositan en el fondo del separador, pero a menudo, estos no se recuperan (lo que afecta el buen funcionamiento del órgano) o se disponen ilegalmente en el suelo después de ser recolectados [30].

Los separadores gravitatorios convencionales se extienden no solo en áreas industriales y de mantenimiento, en refinerías, estaciones de almacenamiento y distribución de petróleo, sino también en aeropuertos, mantenimiento de vehículos y otras actividades relacionadas con dicho combustible fósil. Por ende, sedimentos contaminados con hidrocarburos de los separadores, están presentes en estaciones de servicio y gas, lavaderos de autos, cambios locales de aceite y lubricante, talleres mecánicos, terminales y generadores de energía a base de combustibles fósiles, entre otros [29, 31].

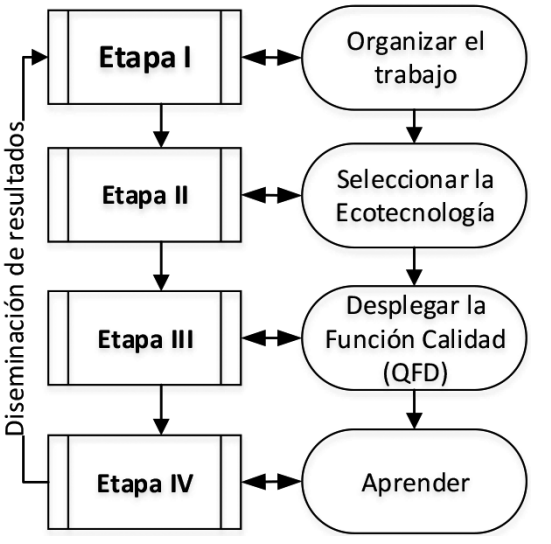

Figura 1. Etapas del procedimiento utilizado.

Por una parte, se tienen la amplia distribución en los territorios de sistemas de separación convencional y su alta frecuencia de trabajo (incluye las dimensiones espacio-tiempo); unido a las malas prácticas en el mantenimiento y disposición de sólidos asociados a su funcionamiento. De otra parte, la gravedad y la sinergia de los potenciales impactos negativos de los residuos petrolizados convierten a estos últimos en estresantes crónicos sobre los sistemas socio-ecológicos y tecnológicos (SETS's), aumentando la exposición en términos de población y por ende, la vulnerabilidad territorial [32].

b) ¿Cuál es el referencial de excelencia?
A nivel local, se encuentran antecedentes de una tecnología desarrollada para el tratamiento de suelos contaminados con hidrocarburos y residuos sólidos petrolizados, con resultados satisfactorios en varias entidades del sector petrolero cubano [33]. La misma fue posteriormente reportada como patente de invención con un método que combina las técnicas de bioestimulación y bioaumentación para la biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos y residuos sólidos petrolizados, desarrollando un proceso biotecnológico satisfactorio [34].

Asimismo, se reporta la aplicación de microorganismos marinos en la biotecnología del petróleo como resultado de un proyecto de investigación que abarcó desde el aislamiento y conservación de bacterias marinas capaces de degradar el petróleo, hasta el desarrollo de bioproductos capaces de degradar el petróleo contaminante en aguas y tierras aplicados mediante la técnica de bioaumentación [33].

Sin embargo, en concordancia a las definiciones dadas por de EPA [35], las denominadas tecnologías consagradas por su uso (reportadas anteriormente como antecedentes de aplicación), fueron ambas concebidas para el tratamiento de grandes volúmenes de residuos petrolizados. Dichos volúmenes ya fuesen debido a accidentes tecnológicos, o por confinamiento sistemático de pasivos ambientales. En consecuencia, dichas tecnologías resultan descontextualizadas, para el tratamiento periódico de volúmenes de residuales petrolizados considerados como pequeños, o de menor magnitud, generados principalmente como lodos de separadores gravitatorios convencionales, pertenecientes a sistemas de tratamiento de residuales, de múltiples pequeñas y medianas entidades del sistema empresarial.

Todo lo anterior, creó la necesidad de encontrar una solución abordada desde un enfoque integral, orientada a la sostenibilidad y de base socio-ecológica, para aumentar la resiliencia territorial frente al problema ambiental en cuestión, en correspondencia con criterios reportados por Ocampo, Marie, James y Mae [18].

Consecuentemente, se realizó una comparación entre las técnicas de tratamiento biológicas con efectividad demostrada para suelos, sedimentos y lodos contaminados con hidrocarburos. Para el análisis de las diversas alternativas se utilizaron los criterios reportados por EPA, [35-37] atendiendo a las ventajas y desventajas respecto a aspectos como: i) simplicidad en la aplicación; ii) tiempos de tratamiento; iii) efectividad frente a diversos tipos de residuos petrolizados incluidos los llamados de degradación lenta; iv) área de efectiva ocupada y localización de la misma respecto al sitio contaminado (*in-situ* o *ex-situ*); v) Riesgos de la tecnología y posibles emisiones; vi) costos estimados de aplicación. En la Tabla 1 se sintetiza toda la información precedente.

La tecnología de biopilas fue la seleccionada atendiendo a un balance técnico-económico-ambiental de los criterios analizados. Las expectativas de salida del proyecto BIOPILA, se correspondieron con una técnica innovadora, como alternativa a las ya consagradas por su uso en el país, con la pretensión de ser menos costosa, eficaz para tratar diversos tipos de residuales petrolizados y aplicable periódicamente a pequeños volúmenes de suelos, sedimentos y/o lodos contaminados con hidrocarburos provenientes de los mantenimientos de sistemas de separación gravitatoria convencional existentes en múltiples instalaciones industriales. Asimismo, concebida para ser generalizada como opción de mejora, dentro de los sistemas de gestión ambiental empresarial.

Procedimiento para la implementación del QFD
Por la importancia para la comprensión de lo realizado, se particulariza en la explicación de la construcción de la casa de la calidad (etapa III), la cual se considera como el constructo central del QFD [18]. Dicha etapa se nutrió de varias experiencias de QFD aplicadas en diversos sectores y productos [17-27, 38], que fueron ajustadas a los objetivos del proyecto en cada paso adoptado, según

Tabla 1. Tecnologías de tratamiento biológicas con efectividad demostrada para suelos, sedimentos y lodos contaminados con hidrocarburos.

Tecnologías	Simplicidad	Tiempo	Efectividad	Área	Riesgos y emisiones	Costos
Bioventeo	Requiere de la utilización de equipos mecánicos y automatizados para ventilación.	De seis meses a dos años.	Concentraciones del contaminante inicialmente pueden ser tóxicas para los microorganismos. No aplicable a suelos poco permeables.	Usado para abordar áreas inaccesibles. Técnica *in-situ*.	Crea una perturbación mínima en el sitio. Requiere de solicitud de permisos de operación para inyección de aire.	De $45 a $140 por cada 1000 kg de suelo contaminado.
Biolabranza (Landfarming)	Relativamente Simple de implementar. Requiere de equipos mecanizados para la homogenización y aireación. Puede requerir de la adición de nutrientes.	De seis meses a dos años	Efectivo en diversos contaminantes orgánicos con tasa de degradación lenta. Puede no ser efectivo para concentraciones de contaminante superiores a 50 000 $mg{\cdot}kg^{-1}$, o de metales pesados superiores a 2500 $mg{\cdot}kg^{-1}$.	Requiere gran extensión de tierra para el tratamiento *ex-situ*, de acuerdo con el requisito de altura máxima de la mezcla a tratar.	Permanece expuesta a factores climáticos ambientales. Se debe considerar un protector contra la lluvia. Requiere revestimiento inferior para el control de lixiviados. La generación de polvo y vapor durante la aireación impactan la calidad del aire.	De $30 a $60 por cada 1000 kg de suelo contaminado.
Biopilas	Simple de implementar. Puede diseñarse para para diversas condiciones de suelo y residuos petrolizados. La homogenización y aireación pueden realizarse manualmente. Requiere de la adición de nutrientes, permite la introducción de técnicas de compostaje.	De seis meses a dos años.	Efectivo en diversos contaminantes orgánicos con tasa de degradación lenta. Puede no ser efectivo para concentraciones de contaminante superiores a 50 000 $mg{\cdot}kg^{-1}$, o de metales pesados superiores a 2500 $mg{\cdot}kg^{-1}$.	Requiere de un área para el tratamiento *ex-situ*. Requiere menor área en comparación con la Biolabranza.	Puede ser diseñado en un sistema cerrado donde las emisiones pueden ser controladas. Requiere revestimiento inferior para el control de lixiviados. Presenta riesgo de exposición humana.	De $30 a $90 por cada 1000 kg de suelo contaminado.
Bio-aumentación	Deben realizarse cultivos de enriquecimiento, aislar microorganismos, y cultivarlos hasta obtener grandes cantidades de biomasa. Requiere planta de producción *in-situ*. El consumo de materias primas como medio de cultivo, aumenta el costo.	De seis meses a un año.	Efectivo en diversos contaminantes orgánicos con tasa de degradación lenta. No resulta factible para pequeños volúmenes.	Utilizado *in-situ* o *ex-situ*. Puede combinarse con otras técnicas.	Requiere de solicitud de permisos de operación para la liberación de bioproductos al medio ambiente.	De $100 a $250 por cada m^3 de suelo contaminado (en dependencia del proceso productivo).
Atenuación natural	Es la alternativa más simple de implementar y crea el mínimo disturbio en el sitio de operaciones.	Periodos mayores a dos años.	Puede no ser efectivo para concentraciones del contaminante superiores a 20 000 $mg{\cdot}kg^{-1}$. No elegible cuando hay presencia de productos libres. Es necesario proyectar medidas de contingencia (en ese caso aumentan los costos).	Usado para abordar áreas inaccesibles. Técnica in-*situ*.	No genera desechos de remediación. Reducción del potencial de transferencia cruzada de contaminantes asociados con el tratamiento *ex-situ*. No es adecuado cuando la contaminación tiene impacto en un medio receptor de agua. Menor riesgo de exposición humana.	Es la técnica menos costosa. Los costos pueden aumentar si el monitoreo se prolonga.

la convergencia metodológica como se describe a continuación: paso 1) definición de los requerimientos del cliente (Qué's); paso 2) establecer el grado de importancia de los Qué's (prioridades); paso 3) evaluar el servicio ofrecido por la competencia; paso 4) definición de las características del producto (Cómo's); paso 5) analizar la relación entre los Qué's y los Cómo's; paso 6) jerarquización de los Cómo's; paso 7) estructurar el techo de la Casa de la Calidad y paso 8) establecer prioridades para requerimientos técnicos (Cómo's). A pesar de que para estructurar la matriz QFD se especificaron 8 pasos, durante la implementación no fue necesario completarlos todos en concordancia con lo reportado por Ocampo, Marie, James y Mae [18].

1) Definición de los requerimientos del cliente (Qué's)
Lo más importante para el uso del método QFD y completar la matriz, fue conocer la sucesión de entradas y salidas. Estas fueron establecidas a través de la aplicación de técnicas de investigación cualitativas y cuantitativas [20]. Fue una etapa de revisión documental, recogida y análisis de información dirigida hacia todas las partes interesadas. Se elaboró una lista de requerimientos obtenida a través de entrevistas y comunicaciones personales con los principales clientes potenciales, en línea con lo reportado por Erkarslan y Yilmaz [21] y Kapuria y Karmaker [22]. Luego, se destacaron algunas necesidades principales y se especificaron algunos problemas, basados en la experiencia previa en la temática del equipo de investigación [14, 15]. También se analizó información histórica y antecedentes de servicios científico-técnicos, inspecciones, licencias ambientales y regulaciones establecidas, servicios de auditorías ambientales, encuestas de satisfacción de los clientes ante servicios de remediación y saneamiento de zonas contaminadas con hidrocarburos, análisis de las tecnologías aplicadas con anterioridad en el país y revisión de reportes científico técnico de sus resultados. Asimismo, se tuvieron en cuenta recomendaciones recogidas en memorias y conclusiones de eventos científicos internacionales y exposiciones en la temática bajo análisis.

2) Establecer el grado de importancia de los Qué's
Todos los requerimientos identificados se consideraron importantes, sin embargo, se utilizó una escala de pesos para representar las áreas de interés más significativas, o sea, diferenciar las expectativas de los clientes. Se utilizó una escala ordinal de 0 a 10, donde 10 es lo más importante [19, 24]. Se envió un formulario a los gestores ambientales de 25 entidades del territorio identificadas como partes interesadas potenciales, para que asignaran el nivel de importancia a los requerimientos recopilados o incluyeran nuevos requerimientos. Se tomó la mediana de las votaciones asignadas a cada requerimiento como criterio para asignar el grado de importancia, redondeándose dicho estadístico por exceso o por defecto, al entero superior o inferior más próximo según correspondió. Las votaciones por individual se mantuvieron con carácter anónimo, atendiendo a criterios éticos adoptados para la investigación. Al concluir este paso, se obtuvo la lista jerarquizada de las expectativas de las principales partes interesadas [17, 22].

3) Evaluar el servicio ofrecido por la competencia.
Como ha sido abordado previamente en el análisis del referencial de excelencia, solo existen dos entidades que figuran con antecedentes de técnicas consagradas por su uso en la biorremediación de residuos petrolizados en Cuba [33]. Las mismas dentro del proyecto BIOPILA no actuaron como competidores, por el contrario, estuvieron implicadas en tareas específicas durante la concepción y ejecución, desempeñándose como entidades "participante" y "consultora" (de acuerdo con la nomenclatura para la gestión de proyectos utilizada en Cuba). La colaboración persiguió la búsqueda de una técnica alternativa a las técnicas ya consagradas por su uso en el país, que resultara eficaz y de aplicación periódica a volúmenes considerados pequeños, generados por los sistemas de tratamiento de residuales, de múltiples pequeñas y medianas entidades del sistema empresarial. Dentro de dicho contexto, no se consideró indispensable completar la evaluación del servicio ofrecido por la competencia para el presente caso de estudio, en línea con los resultados de Bereketli y Genevois [28].

4) Definición de las características del producto (Cómo's)
En este paso, se definió "Cómo" satisfacer cada requerimiento del cliente ("Qué"). Resultó primordial tanto el trabajo en equipo a partir de la lluvia de ideas, dinámicas grupales y la revisión documental [17], como el uso de manuales y estándares nacionales e internacionales [39-41]. Específicamente, EPA [36], establece la secuencia de etapas para

la evaluación de la eficacia del tratamiento por biopilas, adoptándose los requisitos de dichas etapas como "voz de la ingeniería". Una vez definidos los Cómo's, se estableció para cada uno su valor objetivo y su meta de diseño. Se utilizaron como metas elevar (↑), disminuir (↓), o mantener (○), representadas respectivamente en dependencia de si: i) más es mejor; ii) menos es mejor; iii) hay un objetivo específico que se necesite alcanzar [26, 27].

5) Analizar la relación entre los Qué's y los Cómo's
Para evitar las dificultades y poder apreciar el peso relativo de los Qué's, se pasó de la representación de los datos en listas, a la representación matricial. En la matriz de relaciones, las filas correspondieron a los Qué's y las columnas a los Cómo's y sus relaciones se definieron en base a tres niveles: fuerte, media y débil [25]. Para llegar a un consenso sobre cuánto afectaba cada característica de la ecotecnología de biopilas (voz de la ingeniería) a cada uno de los requerimientos de las partes interesadas (voz del cliente), se recurrió a los conocimientos propios y experiencia del equipo de trabajo, así como a un riguroso estudio del estado del arte, entrevistas, estudios estadísticos, experimentos controlados y trabajo grupal.

6) Jerarquización de los Cómo's
Se eligió uno de los criterios más frecuentes para asociar puntuaciones a los tres niveles de relación adoptados. Se utilizó para fuerte 9, para media 3 y para débil 1, debido a que con estos números se logra una mayor diferenciación de los pesos absolutos y relativos de los Cómo's. Se votó 0 cuando no se consideró relación. Se utilizaron símbolos y códigos de colores en aras de facilitar el entendimiento de la matriz para los que carecen de experiencia o conocimiento sobre términos técnicos [19-21, 27].

7) Estructurar el techo de la Casa de la Calidad.
Los distintos Cómo's, rara vez son independientes los unos de los otros, por ello resultó interesante analizar las posibles relaciones existentes entre ellos. En consecuencia, se construyó la matriz de correlaciones para los Cómo's (también conocida como techo). En este techo aparece indicado el sentido y el grado de la correlación existente entre los distintos Cómo's, examinados dos a dos de manera sucesiva. Permitió identificar posibilidades de aprovechar sinergias (correlación positiva) y de evaluar las correlaciones negativas, lo cual resultó importante para la toma de decisiones. Para estructurar la matriz de correlaciones se utilizaron las siguientes cuatro categorías y símbolos respectivamente: i) fuerte-positiva (++); ii) positiva (+); iii) fuerte-negativa (--); iv) negativa (-). Cuando no existió correlación la casilla se dejó en blanco [24, 26-27].

8) Establecer prioridades para requerimientos técnicos (Cómo's)
Para establecer prioridades dentro de los Cómo's se calcularon los pesos relativos, con el objetivo de conocer qué tan importante es una característica de diseño en ayudar a obtener las necesidades del cliente. Se obtuvieron al multiplicar la prioridad de cada Qué, por la intensidad de la relación entre el Qué y el Cómo, y sumando los resultados para toda la columna del Cómo [19, 23].

Para una mejor orientación de los 8 pasos en la construcción de la casa de la calidad se muestra la Figura 2, que relaciona cada paso con el componente de la casa a ser construido. El proceder fue desarrollado empleando el software profesional STATGRAPHICS Centurion v. 16.1.18.

Como QFD es un proceso iterativo, después de obtener la casa de la calidad que definió la configuración conceptual, se prosiguió para determinar los principales requisitos de diseño. Se realizó una explosión de los componentes de la tecnología, desplegando la voz del cliente hacia un segundo nivel o casa. Para ello se aplicaron análogamente los pasos del procedimiento para obtener la primera casa. Solo se adicionó el

Fuente: Modificado de [20].

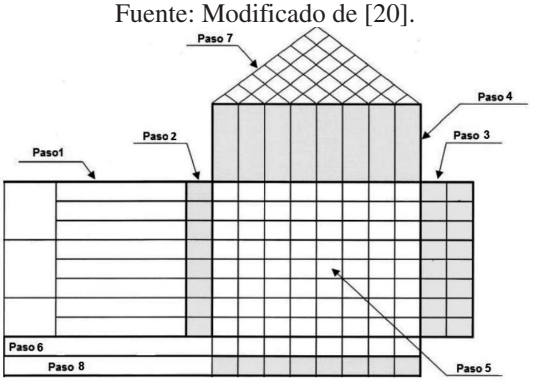

Figura 2. Pasos del procedimiento utilizado para construir cada componente de la HoQ.

mecanismo de la traducción Qué's-Cómo's-Cuánto. Los Cómo's pasaron a ser nuevos Qué's, mientras que los pesos relativos de la casa anterior se convirtieron en las nuevas prioridades de los Qué's. Para ello se utilizó una escala de 0 a 10, donde el mayor valor obtenido de los pesos relativos se igualó a 10 y a partir de esto, los restantes valores se calcularon mediante proporcionalidad, en línea con lo descrito en Gutiérrez y de la Vara [38], redondeando por exceso o por defecto según correspondió.

RESULTADOS

En la Figura 3 se muestra la casa de la calidad para la configuración conceptual de las unidades experimentales a ser utilizadas a escala de banco para la evaluación de la biodegradación de diferentes tratamientos de la ecotecnología de biopilas. Las necesidades de los clientes obtenidos según el paso 1 de la etapa III, se pueden observar en la columna del extremo izquierdo del HoQ, mientras que el grado de importancia según lo declarado en el paso 2, se muestra en la columna del extremo derecho denominada prioridad. Las metas de diseño simbolizadas se relacionaron con la conveniencia de cada objetivo de acuerdo con el paso 4. En la parte inferior de la matriz, se totalizan los pesos absolutos y relativos como se explica en el paso 8. Las interacciones del techo se describen en la leyenda superior de la figura. Por su parte las relaciones entre los Cómo y los objetivos de diseño son descritas en la Tabla 2, estos últimos representados ya sea por etiquetas, valores nominales, o rangos que favorecen el proceso de biorremediación por biopilas, mientras que las metas simbolizadas guardaron relación con lo deseable respecto a cada objetivo.

Como puede ser apreciado, a una simple ojeada la matriz no posee ni filas ni columnas vacías, por lo que se descartan tanto expectativas no satisfechas, como acciones que no responden a ninguna necesidad.

A raíz de la evaluación se obtuvieron los pesos relativos para cada característica de diseño en relación con las expectativas. Del análisis de los pesos relativos es destacable resaltar que: entre el aumento de la concentración de BHT, la mantención de la relación de concentración de C: N: P: K y la concentración máxima de HTP en la biopila; se acumularon más del 50% de los pesos relativos de la matriz QFD de primer nivel. Por tanto, dichas características fueron tenidas muy en cuenta para la etapa de diseño.

En cuanto al techo de la casa puede observarse marcada presencia de correlación positiva y fuerte

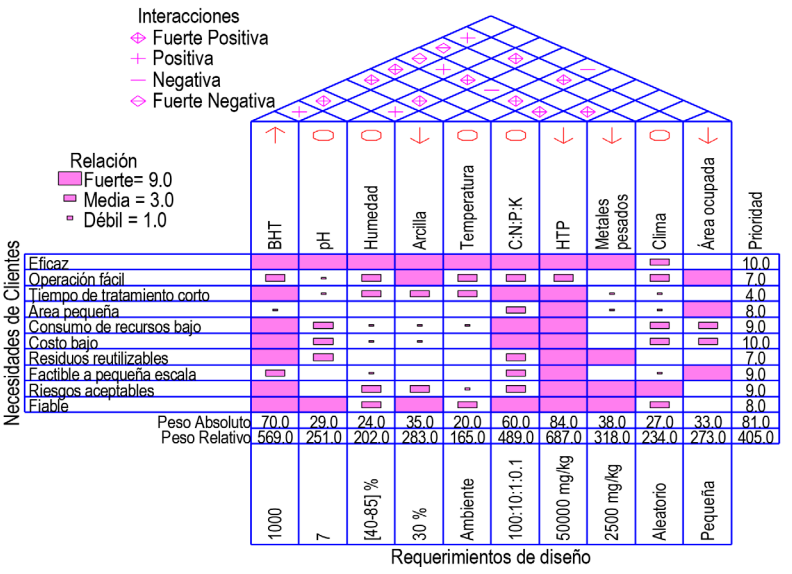

Figura 3. HoQ de la configuración conceptual de las unidades experimentales empleadas a escala de banco para la evaluación de la biodegradación de diferentes tratamientos de la ecotecnología de biopilas.

Tabla 2. Descripción de los Cómo's en la matriz de primer nivel.

Requisitos	Descripción
BHT	Concentración de bacterias heterótrofas totales (BHT) superior $1{\cdot}10^3$ UFC·g^{-1}.
pH	El parámetro pH oscila en el rango entre 6 y 8, preferentemente debe ser lo más neutro posible.
Humedad	El contenido de humedad debe oscilar entre el 40 y el 85%.
Arcilla	Los suelos por mezclar deben tener contenidos de arcilla menores que el 30% para que no se formen grumos.
Temperatura	La experimentación se desarrolla a temperatura ambiente para no emplear recursos adicionales.
C: N: P: K	La relación de concentración de nutrientes deberá ajustarse al valor 100:10:1:0.1 respectivamente.
HTP	La concentración máxima de hidrocarburos totales del petróleo (HTP) en la biopila deberá ser inferior a 50000 mg·kg^{-1}.
Metales pesados	La concentración inicial de metales pesados en la biopila deberá ser inferior a 2500 mg·kg^{-1}.
Clima	Influencia de las condiciones climáticas será aleatoria según comportamiento del tiempo.
Área ocupada	El total del área necesaria para desarrollar la ecotecnología deberá ser tan pequeña como sea razonablemente posible.

positiva. Lo anterior guarda relación con el criterio de Gutiérrez y de la Vara [42] respecto a la correlación positiva entre subprocesos relacionados, puesto que fueron adaptados como "voz de la ingeniería", las etapas secuenciadas para la evaluación de la eficacia de la tecnología de biopila según EPA [36].

Asimismo, se observaron correlaciones fuertes negativas de BHT respecto a HTP y metales pesados. La explicación se debe a la proporcionalidad directa entre concentración de microorganismos heterótrofos y biodegradación de hidrocarburos debido a la actividad microbiana; por tanto, al aumentar BHT disminuye HTP. Por su parte, una concentración de HTP superior a 50000 mg·kg^{-1}, o una mayor presencia de metales pesados de lo tolerado, puede inhibir el crecimiento microbiano [12]. Consecuentemente, el tipo de residual a tratar constituyó un factor crítico de diseño y por ende, resultó una premisa su caracterización previa.

Además, se observaron correlaciones negativas entre la temperatura de las biopilas y el área ocupada, así como, entre porcentaje de arcilla y HTP. Esta última explicada debido a que suelos con mayor presencia de arcilla poseen mayor predisposición a la compactación, lo que dificulta la degradación de hidrocarburos al afectar el intercambio de aire en las biopilas y consigo, la disminución de las concentraciones de microorganismos degradadores [42].

La configuración conceptual de la ecotecnología de biopilas para los fines investigados, obtenida como resultado de implementar el QFD a un primer nivel, permitió que se trasladaran al siguiente nivel de refinamiento las prioridades iniciales de las partes interesadas, en busca de desplegarlas hasta los requisitos de diseños. En la Figura 4 se muestra la matriz correspondiente al segundo nivel (HoQ 2), obtenida análogamente al despliegue realizado para obtener la HoQ 1. Asimismo, los Cómo's, de la Figura 4 y la relación con sus objetivos y metas fueron definidos subsecuentemente en la Tabla 3.

En la Figura 5 se muestra el diagrama de Pareto, en aras de integrar los porcentajes acumulados que ocupan cada uno de los requisitos, a los análisis porcentuales simples sobre los pesos relativos, realizados por Kapuria y Karmaker [22].

Como se puede apreciar, los primeros ocho requisitos de la Figura 4, acumulan más del 75% de los pesos relativos de la matriz desplegada al segundo nivel. Ello les confirió un carácter prioritario siendo los atributos sobre los cuales innovar, para traducir a características de la tecnología, las necesidades deseadas por las partes interesadas. Lo anterior, no indica que fueran desestimados los criterios que constituyen condiciones necesarias para el uso de la ecotecnología y obtuvieron bajos pesos relativos (por ejemplo, el control de lixiviados), simplemente se asegura su presencia en el diseño.

Por la cantidad de requisitos, el análisis del techo en esta matriz de mayor complejidad, fue una labor que exigió colaboración y trabajo en equipo para la

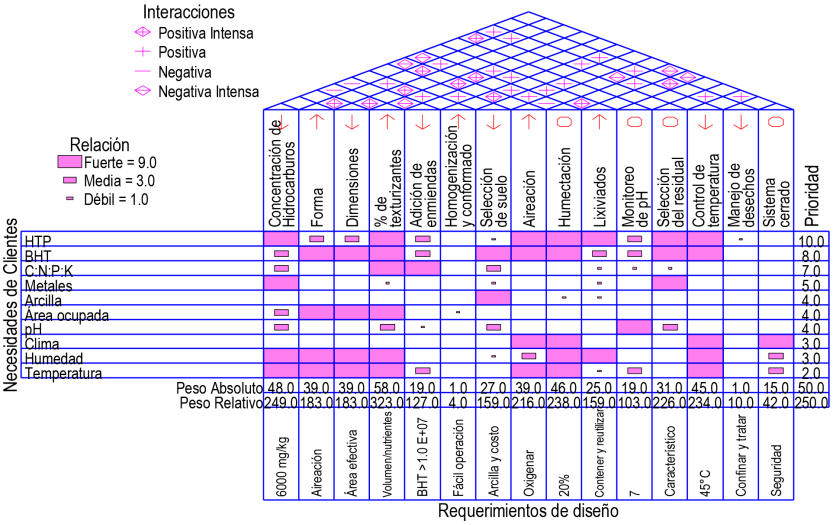

Figura 4. Matriz de requisitos de diseño de las unidades experimentales de las unidades experimentales empleadas a escala de banco para la evaluación de la biodegradación de diferentes tratamientos de la ecotecnología de biopilas.

Tabla 3. Descripción de los Cómo's en la matriz de segundo nivel.

Requisitos	Descripción
Concentración de hidrocarburos	Establecer concentración inicial de HTP en las biopilas en el rango: 50000>HTP>6000 mg·kg^{-1} (valor máximo recomendado para la tecnología de biopilas>HTP> menor valor de referencia establecido entre la normativa nacional e internacional para suelos de uso industrial) en relación con los restantes parámetros de diseño.
Forma	Establecer geometría de las unidades experimentales, en relación con la aireación de las biopilas según el área de contacto. Criterio importante a tener en cuenta para el futuro escalado.
Dimensiones	Establecer largo, ancho y altura de acuerdo con la forma geométrica con la finalidad de ocupar la menor área.
% de texturizantes	Añadir residuos orgánicos heterogéneos a la mezcla de la biopila partir del reciclaje de la industria local. Criterio incorporado a partir del peso relativo de C: N: P: K en la matriz de primer nivel, en aras generar aportes de nutrientes mediante la adición de texturizantes que son también considerados como agentes de volumen.
Adición de enmiendas	Ajustar la relación C: N: P: K (añadiendo fertilizantes agrícolas) a partir de caracterizar las concentraciones totales en función de los aportes individuales de cada uno de los componentes de la mezcla de las biopilas, y con ello establecer las condiciones necesarias para el crecimiento de microorganismos hasta parámetros deseados.
Homogenización y conformado	Establecer la operatividad de la tecnología. Procedimientos estandarizados para realizar la homogeneización de la mezcla y el conformado de las biopilas hasta alcanzar la forma y dimensiones de diseño.
Selección de suelo	Caracterizar suelo para que el porcentaje de arcilla sea menor al 30% y sea de baja calidad agrícola en función de no utilizar suelos eficientes para la producción alimentaria.
Aireación	Establecer frecuencia de volteo y el procedimiento estandarizado para realizarlo.
Humectación	Establecer el porcentaje de humedad mínimo a mantener (20%) en las biopilas durante la biodegradación.
Lixiviados	Establecer los mecanismos de contención, reciclaje, confinamiento y tratamiento de los lixiviados.
Monitoreo de pH	Establecer procedimiento, frecuencia, método y acciones correctivas para el control de pH.
Selección del residual	Experimentar con un residual petrolizado heterogéneo que asegure la eficacia y generalización del tratamiento.
Control de Temperatura	Establecer procedimiento, frecuencia, método y acciones correctivas para el control de temperatura (45 ºC).
Manejo de desechos	Establecer las medidas de gestión de residuos durante el montaje, homogenización y el conformado de las biopilas.
Sistema cerrado	Mantener la seguridad del del experimento frente a eventos climáticos, acceso de animales e actos ilegales.

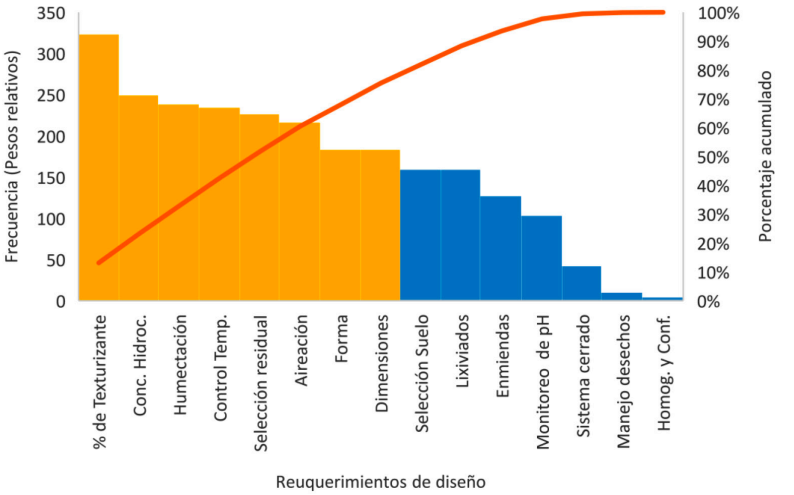

Figura 5. Diagrama de Pareto para los pesos relativos de los requisitos desplegados a un segundo nivel.

búsqueda de criterios unificados y compromiso. El análisis sirvió, como instrumento de verificación y también de mejora. Los aspectos más significativos de correlación negativa estuvieron relacionados con la disminución de la variable HTP al aumentar otras como: humectación, aireación, porciento de texturizantes y adición de enmiendas. Todo lo anterior se sustenta en los principios de la biodegradación, ya que al aumentar los nutrientes (enmiendas y texturizantes) se estimula la actividad microbiana y sus funciones metabólicas; que igualmente se ven favorecidas ante condiciones húmedas y en presencia de oxígeno [12, 37].

Especial atención recibió por parte del equipo de trabajo, la correlación muy fuerte negativa entre el% de texturizantes y la adición de enmiendas (entiéndase por este último la adición de abonos industriales que contienen compuestos de C, N, P, K respectivamente). En ello se identificó una oportunidad de reducir los costos de la ecotecnología, en correspondencia con los principios de Producción Más Limpia y Economía Circular, puesto que permite la reducción de la utilización de abonos industriales, introduciendo residuos orgánicos agrícolas e industriales (texturizantes) como agente de volumen en el conformado de las biopilas [43, 44].

Asimismo, en trabajos reportados en la literatura se ha encontrado que la actividad microbiana puede ser estimulada mediante la adición de residuos orgánicos, de origen agrícola o industrial, que proporcionan nutrientes, flora microbiana, mejoran la porosidad y la aireación, y mantienen los niveles de humedad requeridos [45, 46]. Estos también actúan como agente de volumen, lo que asegura una disminución del consumo del recurso suelo y favorecen la aireación entre las partículas del suelo y con ello estimula la biodegradación [47].

También fueron tomados en cuenta para el diseño de las unidades experimentales, la relación entre factores los abióticos aireación, humectación, control de temperatura y clima, ya que son factores que se correlacionan negativamente entre sí o con la concentración final de hidrocarburos, pero un desequilibrio en alguno de ellos puede afectar la eficacia del tratamiento. Mayores detalles acerca de las relaciones entre los factores abióticos pueden ser encontrados en investigaciones reportadas previamente por los autores [48]. El resto de las correlaciones negativas se manifiestan entre variables ambientales que pudieran controlarse en su mayoría al establecer los experimentos en un sistema cerrado que en principio proteja las biopilas de la exposición a lluvias, vientos, radiaciones solares, intervención de animales, entre otros.

La etapa se concluyó con los protocolos experimentales para el diseño ingeniero, que permitieron construir un prototipo a escala de banco, de las unidades experimentales para la evaluación de diversos

tratamientos de la ecotecnología de biopilas. Detalles de las unidades experimentales diseñadas como resultado de la presente investigación y las diferentes condiciones operativas pueden ser consultados en investigaciones previas [49, 50].

CONCLUSIONES

El enfoque utilizado permitió la selección de la ecotecnología y el desarrollo el despliegue de la función calidad como procedimiento estructurado que aseguró la determinación de las expectativas de las instituciones generadoras de residuos contaminados con hidrocarburos, las exigencias de los recicladores, las necesidades gubernamentales y las regulaciones ambientales. Asimismo, con el uso del QFD se logró la traducción sistemática de las necesidades identificadas hasta determinar los protocolos de diseño de las unidades experimentales a escala de banco, empleadas durante la biodegradación en diferentes tratamientos de la ecotecnología de biopilas, evaluados como alternativa resiliente ante la contaminación del suelo con residuos petrolizados.

Los resultados constituyeron la salida de la etapa de planificación del proyecto BIOPILA y establecieron las necesidades técnico-logísticas para el comienzo de la etapa experimental, contribuyendo a los objetivos del Programa de Ciencia, Tecnología e Innovación de Interés Nacional: "Uso sostenible de los componentes de la Diversidad Biológica en Cuba" del Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente de Cuba.

Asimismo, en el diseño de las biopilas como técnica de tratamiento innovadora, se introdujeron los objetivos del desarrollo sostenible, Producción Más Limpia y Economía Circular, en aras de convertirla en una opción de mejora resiliente ante la contaminación del suelo por residuos petrolizados, que a su vez puede ser generalizada como acción correctiva dentro de los sistemas de gestión ambiental del sistema empresarial.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Programa de Ciencia de Interés Nacional "Uso sostenible de los componentes de la Diversidad Biológica en Cuba" por el financiamiento aportado para las investigaciones pertinentes. A los investigadores y técnicos del Instituto de Ciencias del Mar de La Habana, Cuba (ICIMAR) y de la Unidad Científico-Tecnológica de Base (UCTB) Suelos de Cienfuegos por sus aportes en la concepción de la idea del proyecto.

REFERENCIAS

[1] L. Yu, M. Han and F. He. "A review of treating oily wastewater". Arabian Journal of Chemistry. Vol. 10 Supplement 2, pp. S1913-S1922. 2017. ISSN: 1878-5352. DOI: 10.1016/j.arabjc.2013.07.020.

[2] J. Sangeetha and D. Thangadurai. "Effect of Biologically Treated Petroleum Sludge on Seed Germination and Seedling Growth of Vigna unguiculata (L.) Walp". Brazilian Archives of Biology and Technology. Vol. 57 Nº 3, pp. 427-433. 2014. ISSN: 1516-8913. DOI:10.1590/S1516-89132014005000011.

[3] E. Abouee, M. Kermani, M. Farzadkia, A. Esarfili and M. Ghorbanian. "Study of improvement of bioremediation performance for the degradation of petroleum hydrocarbons in oily sludge by a chemical pretreatment strategy". Journal of Material Cycles and Waste Management. Vol. 21 Isssue 5, pp. 1052-1062. 2019. ISSN: 1611-8227. DOI: 10.1007/s10163-019-00848-y.

[4] F. Bosco, A. Casale, I. Mazzarino, A. Godio, B. Ruffino, C. Mollea and F. Chiampo. "Microcosm evaluation of bioaugmentation and biostimulation efficacy on diesel-contaminated soil". Journal of Chemical Technology and Biotechnology. Vol. 95 Issue 4, pp. 904-912. 2020. ISSN: 1097-4660. DOI: 10.1002/jctb.5966.

[5] OEHHA. "Air toxics hot spots program: Guidance manual for preparation of health risk assessments". Office of Environmental Health Hazard Assessment (OEHHA). 2015. Fecha de consulta: 20 de junio de 2020. URL: https://oehha.ca.gov/media/downloads/crnr/2015gmappendices.pdf

[6] International Agency for Research on Cancer (IARC). "Some non-heterocyclic polycyclic aromatic hydrocarbons and some related exposures". IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Vol. 92, pp. 33-233. Lyon, France, 2010. ISBN: 9789283212928. URL: https://www.cancer-environnement.fr/Portals/0/

Documents%20PDF/Rapport/OMS-WHO/IARC/2010_IARC_mono92.pdf

[7] ONU. "Transforming our worl: The 2030 agenda for sustainable development", pp. 1-40. 2015. United Nations Organization (ONU). 2015. Fecha de consulta: 04 de agosto de 2016. URL: https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld/publication

[8] M. Usman. "A comprehensive guide of remediation technologies for oil contaminated soil - present works and future directions". Marine Pollution Bulletin. Vol. 110 Nº 1, pp. 619-620. 2016. ISSN: 0025-326X. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2016.04.023.

[9] A. Casale, F. Bosco, F. Chiampo, D. Franco, B. Ruffino, A. Godio and P.R. Pujari. " Soil microcosm set up for a bioremediation study". Sixth International Conference on Advances in Bio-Informatics, Bio-Technology and Environmental Engineering-ABBE 2018, pp. 12-15. Zurich, Switzerland. April 28-29, 2018. ISBN: 978-1-63248-148-1. DOI: 10.15224/978-1-63248-148-1-03.

[10] S. Simpanen, M. Dahl, M. Gerlach, A. Mikkonen, V. Malk, J. Mikola and M. Romantschuk. "Biostimulation proved to be the most efficient method in the comparison of in situ soil remediation treatments after a simulated oil spill accident". Environmental Science and Pollution Research. Vol. 23, pp. 25024-25038. 2016. ISSN: 1614-7499. DOI: 10.1007/s11356-016-7606-0.

[11] J.N. Mohsen, M.A. Kareem and K.E. Hasan "Bioremediation of petroleum hydrocarbons contaminated soil using biopiles system". Baghdad Science Journal. Vol. 16 Nº 1 Supplement, pp. 185-193. 2019. ISSN: 2411-7986. DOI: 10.21123/bsj.2019.16.1(Suppl.). 0185.

[12] T. Volke y J.A. Velasco. "Tecnologías de remediación para suelos contaminados" Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT), pp. 1-64. México DF, México. ISBN: 968-817-557-9. 2002. URL: https://www.virtualpro.co/biblioteca/tecnologias-de-remediacion-para-suelos-contaminados

[13] Agencia de Medio Ambiente y Instituto de Ecología y Sistemática. "Programa nacional ciencia y técnica: Uso sostenible de los componentes de la diversidad biológica en Cuba". Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente de Cuba, pp. 1-5. Fecha de consulta: 20 de febrero de 2016. URL: http://repositorio.geotech.cu/xmlui/handle/1234/3990

[14] D.J. Castro, O. Gutiérrez, J.R. Poma, J. Bermúdez, M. Demichela. "Environmental monitoring in a Cuban oil storage plant to characterize the hydrocarbons pollution exposure in the fence-line community". 31st European and Safety Reliability (ESREL 2021), pp. 2299-2304. Angers, France. September 19-23, 2021. ISBN: 978-981-18-2016-8. DOI: 10.3850/978-981-18-2016-8_649-cd.

[15] D.J. Castro, O. Gutiérrez, J.R. Poma, J. Bermúdez and M. Demichela. "Procedure for technological diagnosis of oily residuals management in Cubans distributed generation power plants". The 10th Through-Life Engineering Services Conference (TESCONF 2021), pp. 1-7. Twente, Netherlands. November 16-17,2021. DOI: 10.2139/ssrn.3945067.

[16] CITMA. "Proyecto Estrategia Ambiental Territorial. Provincia de Cienfuegos 2021/2030. Etapa 2021-2025". Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente de Cuba (CITMA), pp. 1-60. 2021.

[17] M. Younesi and E. Roghanian. "A framework for sustainable product design: a hybrid fuzzy approach based on quality function deployment for environment". Journal of Cleaner Production. Vol. 108 Part A, pp. 385-394. 2011. ISSN: 0959-6526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.09.028.

[18] L. Ocampo, A. Marie, J. James and A. Mae. "On a generic framework for sustainable product design: An application to a food product". Journal of Agriculture and Technology Management. Vol. 19 Issue 1, pp. 9-21. 2018. ISSN: 2599-4980. URL: http://jatm.ctu.edu.ph/index.php/jatm/article/view/119/149

[19] A. Lovan-Dragomir and A. Luca. "Application of QFD method in fitness footwear production". Revista de Pielarie Incaltaminte. Vol. 18 Nº 2, pp. 153-162. 2018. ISSN: 1583-4433. DOI: 10.24264/lfj.18.2.11.

[20] I. Chudjakova and J. Tobiška. "Qfd Example in Interaction with HMI". Acta Polytechnica CTU Proceedings. Vol. 12, pp. 10-12. Prague, Czech Republic. 2017. DOI:10.14311/APP.2017.12.0010.

[21] Ö. Erkarslan and H. Yilmaz. "Optimization of product design through quality function deployment and analytical hierarchy process: Case study of a ceramic Washbasin". Journal of the Faculty of Architecture. Vol. 28 Nº 1, pp. 1-22. 2011. ISSN: 0258-5316. DOI: 10.4305/METU.JFA.2011.1.

[22] T.K. Kapuria and C.L. Karmaker. "Customer driven quality improvement of Jute Yarn using AHP Based QFD: A case study". International Journal for Quality Research. Vol. 12 Nº 1, pp. 63-80. 2017. ISSN: 1800-6450. DOI: 10.18421/IJQR12.01-04.

[23] H. Gutiérrez, P. Gutiérrez, C. Garibay y L. Díaz. "Análisis multivariado y QFD como herramientas para escuchar la voz del cliente y mejorar la calidad del servicio". Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería. Vol. 22 Nº 1, pp. 62-73. 2014. ISSN: 0718-3305. DOI: 10.4067/S0718-33052014000100007.

[24] J. Cho, J. Chun, I. Kim and J. Choi. "Preference evaluation system for construction products using QFD-TOPSIS logic by considering trade-off technical characteristics". Mathematical Problems in Engineering. Vol. 2017, pp. 1-15. 2017. ISSN: 1563-5147. DOI: 10.1155/2017/9010857.

[25] W.C. Ho, A.W. Lee, S.J. Lee and G.T.R. Lin. "The Application of Quality Function Deployment to Smart Watches,The House of Quality for Improvement Product Design". Journal of Scientific & Industrial Research. Vol. 77 Nº 3, pp. 149-152. 2018. ISSN: 0022-4456. DOI: 10.23919/PICMET.2017.8125413.

[26] M. Kowalska, M. Pazdzior and A. Krzton-Maziopa. "Erratum to: Implementation of QFD method in quality analysis of confectionery products". Journal of Intelligent Manufacturing. Vol. 29 Issue 2, pp. 439-447. 2018. ISSN: 1572-8145. DOI: 10.1007/s10845-015-1131-8.

[27] K. Melemez, G. Di Gironimo, G. Esposito and A. Lanzotti. "Concept design in virtual reality of a forestry trailer using a QFD-TRIZ based approach". Turkish Journal of Agriculture and Forestry. Vol. 37 Nº 6, pp. 789-801. 2013. ISSN: 1303-6173. DOI: 10.3906/tar-1302-29.

[28] I. Bereketli and M.E. Genevois. "An integrated QFDE approach for identifying improvement strategies in sustainable product development". Journal of Cleaner Production. Vol. 54, pp. 188-198. 2013. ISSN: 0959-6526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2013.03.053.

[29] M. Ashraf, U. Shafiq, A. Mukhtar and M. Saeed. "Design of Industrial Gravity Type Separators for the Hydrocarbons and Heavy Oil-Water Separations". Research Journal of Chemical Sciences. Vol. 5 Issue 9, pp. 72-75. 2015. ISSN: 2231-606X. URL: http://www.isca.in/rjcs/Archives/v5/i9/10.ISCA-RJCS-2015-124.php

[30] J. Pichtel. "Oil and Gas Production Wastewater: Soil Contamination and Pollution Prevention". Applied and Environmental Soil Science. Volume 2016, pp. 01-24. 2016. ISSN: 1687-7675. DOI: 10.1155/2016/2707989.

[31] D.C. Ñústez, D. Paredes y J. Cubillos. "Biorremediación para la degradación de hidrocarburos totales presentes en los sedimentos de una estación de servicio de combustible". Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Zulia. Vol. 37 Nº 1, pp. 20-28. 2014. ISSN: 0254-0770. URL: https://www.produccioncientificaluz.org/index.php/tecnica/article/view/6941/6930

[32] E. Pilone, M. Demichela and G. Baldissone. "The Multi-Risk Assessment Approach as a Basis for the Territorial Resilience". Sustainability. Vol. 11 Issue 9, pp. 1-15. 2019. ISSN: 2071-1050. DOI: 10.3390/su11092612.

[33] S. Bonell. "Petróleo y biotecnología: análisis del estado del arte y tendencias". ACIMED. Vol. 19 Nº 1. 2009. ISSN 1024-9435. URL: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1024-94352009000100003&lng=es&nrm=iso&tlng=es

[34] R. Romero, M.A. Díaz y A.C. Nuñez. "Procedimiento para remover hidrocarburos del petróleo". Oficina Cubana de la Propiedad Industrial (OCPI). Patente CU20130118A7. Cuba. 2013.

[35] EPA. "Guía del ciudadano: Técnicas de tratamiento innovadoras, para suelos contaminados, fango residual, sedimentos y detritos". Environmental Protection Agency (EPA). Washington DC, USA. 1996. Fecha de consulta: 25 de marzo de 2016. URL: https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=10002PKE.txt

[36] EPA. "How to Evaluate Alternative Cleanup Technologies for Underground Storage

Tank Sites. A Guide for Corrective Action Plan Reviewers". Environmental Protection Agency (EPA). Washington DC, USA. 2017. Date of visit: November 2017. URL: https://www.epa.gov/ust/how-evaluate-alternative-cleanup-technologies-underground-storage-tank-sites-guide-corrective

[37] J.A. Velasco y T. Volke. "El composteo: una alternativa tecnológica para la biorremediación de suelos en México". Gaceta Ecológica. Nº 66, pp. 41-53. ISSN: 1405-2849. 2003. URL: https://www.redalyc.org/pdf/539/53906604.pdf

[38] H. Gutiérrez y R. de la Vara. "Control Estadístico de la Calidad y Seis Sigma". McGraw-Hill. Tercera Edición, pp. 160-164. México DF, México. ISBN: 978-607-15-0929-1. 2013.

[39] ONN. "NC 819, Manejo de fondaje de tanques de almacenamiento de petróleo y sus derivados". Oficina Nacional de Normalización (ONN), pp. 1-19. La Habana, Cuba. 2017.

[40] ONN. NC TS 1067, Industria del petróleo - Aceites lubricantes usados-Especificaciones". Oficina Nacional de Normalización (ONN), pp. 1-24. La Habana, Cuba. 2015.

[41] SEMARNAT. "NORMA Oficial Mexicana NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012, Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y lineamientos para el muestreo en la caracterización y especificaciones para la remediación". Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2013. Fecha de consulta: 15 de agosto de 2016. URL: https://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/6646/1/nom-138-semarnat.ssa1-2012.pdf

[42] D. Nilanjana and C. Preethy. "Microbial Degradation of Petroleum Hydrocarbon Contaminants: An Overview". Biotechnology Research International. Vol. 2011, pp. 1-13. ISSN: 2090-3146. DOI: 10.4061/2011/941810.

[43] C. Zhang, D. Wu and H. Ren. "Bioremediation of oil contaminated soil using agricultural wastes via microbial consortium". Scientific Reports. Vol. 10 Issue 1, pp. 1-8. 2020. ISSN: 2045-2322. DOI: 10.1038/s41598-020-66169-5.

[44] H. Buendía. "Biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos mediante el compost de aserrín y estiércol". Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Geología, Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas. Vol. 15 Nº 30, pp. 123-130. 2012. ISSN: 1682-3087. DOI: 10.15381/iigeo.v15i30.4101.

[45] R. García-Torres, E. Ríos-Leal, A. Martínez-Toledo, F. Ramos-Morales, J. Cruz-Sánchez y M.d.C. Cuevas-Díaz. "Uso de cachaza y bagazo de caña de azúcar en la remoción de hidrocarburos en suelo contaminado". Revista internacional de Contaminación Ambiental. Vol. 27 Nº 1, pp. 31-39. 2011. ISSN: 0188-4999. URL: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992011000100003&lng=es

[46] W. Chang, A. Akbari, J. Snelgrove, D. Frigon and S. Ghoshal. "Biodegradation of petroleum hydrocarbons in contaminated clayey soils from a sub-arctic site: the role of aggregate size and microstructure". Chemosphere. Vol. 91 Issue 11, pp. 1620-1626. 2013. ISSN: 0045-6535. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2012.12.058.

[47] A. Dzionek, D. Wojcieszyńska and U. Guzik. "Natural Carriers in Bioremediation: A Review". Electronic Journal of Biotechnology. Vol. 23, pp. 28-36. 2016. ISSN: 0717-3458. DOI: 10.1016/j.ejbt.2016.07.003.

[48] E. Casals, D. Rabassa, O. Viera, O. Gutiérrez y D. Castro. "Comportamiento de factores abióticos en la biorremediación de residuos petrolizados mediante biopilas a escala semi-piloto". Revista Centro Azúcar. Vol. 47 Nº 3, pp. 36-46. 2020. ISSN: 2223-4861. URL: http://centroazucar.uclv.edu.cu/index.php/centro_azucar/article/view/588/595

[49] O. Gutiérrez, D. Castro, O. Viera, E. Casals y D. Rabassa. "Diseño ingeniero y montaje de unidades experimentales para la biorremediación de residuos petrolizados a escala de banco". Revista Tecnología Química. Vol. 40 Nº 3, pp. 580-597. 2020. ISSN: 2224-6185. URL: http://scielo.sld.cu/pdf/rtq/v40n3/2224-6185-rtq-40-03-580.pdf

[50] D. Castro, O. Gutiérrez, E. Casals, M. Demichela, A.Godio and F. Chiampo. "Bioremediation of Hydrocarbon-Polluted Soil: Evaluation of Different Operative Parameters". Applied Sciences. Vol. 12 Issue 4, pp. 1-18. 2022. ISSN: 2076-3417. DOI: 10.3390/app12042012.