

**DISEÑO METODOLÓGICO PARA LA EVALUACIÓN Y COMUNICACIÓN DEL
RIESGO AMBIENTAL ASOCIADO A PCB'S EN TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS
DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA DE CODENSA S.A. E.S.P EN BOGOTÁ COLOMBIA**

Universidad El Bosque
Facultad de Ingeniería
Programa Ingeniería Ambiental
Bogotá, abril de 2018

**DISEÑO METODOLÓGICO PARA LA EVALUACIÓN Y COMUNICACIÓN DEL
RIESGO AMBIENTAL ASOCIADO A PCB'S EN TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS
DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA DE CODENSA S.A. E.S.P EN BOGOTÁ COLOMBIA**

Tatiana Lizarazo Lara

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:

Ingeniero Ambiental

Director: Franciso Ibla Gordillo

Coordinador empresarial: Diego Roncancio Lopez

Línea de Investigación:

Gestión Ambiental.

Universidad El Bosque

Facultad de Ingeniería

Programa Ingeniería Ambiental

Bogotá, Colombia

2018

Nota de Salvedad de Responsabilidad Institucional

La Universidad El Bosque, no se hace responsable de los conceptos emitidos por los investigadores en su trabajo, solo velará por el rigor científico, metodológico y ético del mismo en aras de la búsqueda de la verdad y la justicia.

Agradecimientos

En primer lugar agradezco a Dios por haber preparado el camino que debía seguir y orientar cada una de las decisiones que me han llevado a convertirme en la persona que soy ahora, le doy gracias a él porque cada obstáculo avivó las ganas de seguir trabajando por la meta de convertirme en Ingeniera Ambiental de la Universidad El Bosque.

A mis padres Henry Lizarazo y Consuelo Lara, les dedico especialmente este trabajo de grado, gracias por brindarme fortaleza e impulsarme a creer en mí y en mis ideas, por acompañarme y darme la oportunidad de iniciar este proceso de formación, que si bien está a punto de finalizar, abre las puertas a nuevas oportunidades de crecimiento, aprendizaje y emprendimiento. Ellos son el vivo ejemplo de que los sueños se logran a pesar de la adversidad y son mi modelo a seguir.

Agradezco profundamente a mi director de grado Francisco Ibla, a quien tuve la dicha de conocer en los inicios de esta hermosa carrera, él me enseñó la importancia de la responsabilidad, el compromiso y la excelencia, valores que me han acompañado hasta el día de hoy. Tres años después tengo la fortuna de contar con él como director de grado, y no puedo pensar en alguien mejor para haberme orientado y apoyado en la recta final de este proceso. Gracias por haber depositado su confianza, conocimiento y su tiempo en este proyecto, sus enseñanzas me han inspirado a exigirme y mejorar en diferentes aspectos, no sólo académicos. Resalto sobretodo su pasión por el trabajo y la dedicación que le imprime a cada iniciativa, le guardo un respeto y una admiración enorme maestro.

Finalmente le doy gracias a la organización donde doy inicio a mi carrera profesional, Codensa S.A E.S.P, especialmente a la División HSE donde desempeño mi práctica profesional, este grupo de ingenieros talentosos me abrieron las puertas en su grupo de trabajo y plantearon la necesidad que fundamenta este trabajo de grado, les agradezco haberme permitido desarrollar este proyecto de investigación con autonomía y valorar los resultados obtenidos de manera tan positiva, espero poder seguir haciendo parte de esta organización en un futuro, la experiencia ha sido enriquecedora desde todos los puntos de vista y agradezco cada una de las lecciones brindadas.

A todos, muchísimas gracias.

Tabla de Contenido

<i>Tabla de Contenido</i>	5
<i>Listado de Tablas</i>	7
<i>Listado de Figuras</i>	8
<i>Resumen</i>	9
<i>Abstract</i>	9
<i>Introducción</i>	10
<i>1 Planteamiento del Problema</i>	11
<i>2 Justificación</i>	12
<i>3 Pregunta problema</i>	13
<i>4 Objetivos</i>	13
<i>4.1 Objetivo General</i>	13
<i>4.2 Objetivos Específicos</i>	13
<i>5 Marcos de Referencia</i>	14
<i>5.1 Antecedentes</i>	14
<i>5.2 Estado del Arte</i>	16
<i>5.3 Marco Teórico</i>	17
<i>5.4 Marco Conceptual</i>	21
<i>5.4.1 Residuo</i>	21
<i>5.4.2 Residuo Peligroso</i>	21
<i>5.4.3 Transformador Eléctrico de Distribución</i>	21
<i>5.4.4 Fluido dieléctrico</i>	22
<i>5.4.5 Compuestos orgánicos persistentes (COP's)</i>	22
<i>5.4.6 Bifenilos Policlorados (PCB's)</i>	23
<i>5.4.7 Residuo o desecho con PCB's</i>	23
<i>5.4.8 Riesgo</i>	24
<i>5.4.9 Evaluación del Riesgo Ambiental</i>	24
<i>5.4.10 Zona de Riesgo</i>	24
<i>5.4.11 Modelo Físicoquímico</i>	24
<i>5.5 Marco Normativo</i>	25
<i>5.6 Marco Geográfico y Socioeconómico</i>	26
<i>5.7 Marco Institucional</i>	28

6. Metodología.....	29
6.1 Procedimiento para el cumplimiento del Objetivo 1.....	30
6.2 Procedimiento para el cumplimiento del Objetivo 2.....	31
6.3 Procedimiento para el cumplimiento del objetivo 3.....	32
7. Resultados y Discusión.....	33
7.1 Revisión de metodologías de evaluación de riesgo ambiental para la selección de variables de interés en el diseño metodológico.....	33
7.1.1 Manual de Evaluación y Gestión del Riesgo Asociado a los COP del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia (Dirección Desarrollo Sectorial Sostenible, 2007).....	33
7.1.2 Procedimiento de Manejo de PCB durante el Mantenimiento de Equipos (Dirección General de Calidad Ambiental. Ministerio del Ambiente de Perú, 2016).....	35
7.1.3 Metodología de Análisis de Riesgos Ambientales (Norma UNE 150008:2008) de la Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR, 2008).	39
7.2 Análisis comparativo de las metodologías de evaluación de riesgo ambiental.....	41
7.3 Selección de variables para el diseño metodológico de la evaluación del riesgo ambiental asociado a PCB's en transformadores instalados en redes distribución de energía de Codensa S.A E.S.P.....	43
7.4 Implementación de la Metodología semicuantitativa de evaluación del riesgo de exposición asociado a PCB's en transformadores eléctricos de distribución en el perímetro urbano de Bogotá, Colombia	46
7.4.1 Definición del problema.....	46
7.4.2 Análisis del nivel de exposición a PCB's: Aroclor 1260 en el perímetro urbano de Bogotá	57
7.4.3 Formulación del modelo preliminar de comportamiento fisicoquímico del Aroclor 1260 (PCB). 72	
7.4.4 Cuantificación de la exposición ambiental al Aroclor 1260	86
7.5 Lineamientos iniciales para la estrategia de comunicación del riesgo.....	97
8. Conclusiones.....	107
9. Recomendaciones	110
Referencias	111
Anexos.....	118

Listado de Tablas

<i>Tabla 1. Revisión de artículos dirigidos al modelamiento de PCB's en el ambiente</i>	16
<i>Tabla 2. Revisión de artículos dirigidos al modelamiento de PCB's en el ambiente</i>	17
<i>Tabla 3. Marco normativo colombiano para contextualización de la gestión ambiental de PCB's</i>	25
<i>Tabla 4. Abreviaciones figura 5</i>	27
<i>Tabla 5. Procedimientos para la correlación de variables de evaluación del riesgo ambiental de los PCB's, con variables fisicoquímicas de este contaminante</i>	30
<i>Tabla 6. Procedimientos para la evaluación de la metodología preliminar del comportamiento de los PCB's</i>	31
<i>Tabla 7. Procedimientos para la propuesta de lineamientos iniciales de comunicación del riesgo ambiental</i>	32
<i>Tabla 8. Registro de variables de evaluación del riesgo definidas en el Manual de Evaluación y Gestión del Riesgo Asociado a los COP's</i>	35
<i>Tabla 9. Registro de variables de evaluación cualitativa del riesgo definidas en el Procedimiento de Manejo de PCB durante el Mantenimiento de Equipos</i>	37
<i>Tabla 10. Registro de variables en la evaluación cuantitativa del riesgo definidas en el Procedimiento de Manejo de PCB durante el Mantenimiento de Equipos</i>	38
<i>Tabla 11. Categorización y cálculo del riesgo en la evaluación cuantitativa definidos del Procedimiento de Manejo de PCB durante el Mantenimiento de Equipos</i>	38
<i>Tabla 12. Registro de variables de evaluación de riesgo ambiental abstraídos de la norma UNE 150008:2008</i>	40
<i>Tabla 13. Consolidación de la metodología cuantitativa de evaluación del riesgo de exposición asociado a PCB's en transformadores eléctricos de distribución en el perímetro urbano de Bogotá, Colombia</i>	45
<i>Tabla 14. Análisis de los informes de resultados del análisis de PCB's en muestras de aceite dieléctrico</i>	56
<i>Tabla 15. Porcentaje de PCB's presentes en la mezcla comercial Aroclor 1260</i>	57
<i>Tabla 16. Variables fisicoquímicas de interés para el modelo de comportamiento de PCB's del estudio (Finizio, Mackay, Bidelmang, & Harner, 1997)</i>	61
<i>Tabla 17. Variables fisicoquímicas de interés para el modelo de comportamiento de PCB's del estudio (Venier & Hites, 2010)</i>	63
<i>Tabla 18. Expresiones para calcular valores de Z y D</i>	65
<i>Tabla 19. Ecuaciones de flujo y tasa de valores de difusividad</i>	65
<i>Tabla 20. Valores seleccionados para diferentes parámetros ambientales</i>	66
<i>Tabla 21. Variables seleccionadas para el diseño modelo de comportamiento fisicoquímico del Aroclor 1260 (PCB)</i>	71
<i>Tabla 22. Delimitación de grupos de datos para el ajuste del modelo de comportamiento fisicoquímico del Aroclor 1260</i>	82
<i>Tabla 23. Desviación estándar de las variables del modelo</i>	83
<i>Tabla 24. Categorías del riesgo según su extensión</i>	87
<i>Tabla 25. Criterios para la caracterización del riesgo ambiental asociado a PCB's (Aroclor 1260)</i>	92
<i>Tabla 26. Cálculo del índice de riesgo para la caracterización del mismo</i>	94
<i>Tabla 27. Procesos coordinados por la división HSE en la gestión del riesgo asociado a PCB's</i>	98
<i>Tabla 28. Conceptualización de la participación dentro de estrategia de comunicación del riesgo</i>	102

Listado de Figuras

<i>Figura 1. Estructura Metodológica de la Evaluación de Riesgos.....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 2. Estructura metodológica de la evaluación del riesgo ecológico.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 3. Estructura general de un transformador de distribución de Energía.....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 4. Estructura molecular de los bifenilos policlorados PCB's.....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 5. Presencia de Codensa en el Contexto Regional.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 6. Metodología para la Consolidación del Objetivo de Investigación.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 7. Análisis comparativo de las similitudes y diferencias de las metodologías de evaluación del riesgo referenciadas.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 8. Localización del área de estudio de la evaluación de riesgo ambiental asociado PCB's.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 9. Ilustración del escenario de riesgo: Derrame de aceite dieléctrico.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 10. Ilustración del escenario de riesgo: Derrame masivo de aceite dieléctrico.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 11. Ilustración del escenario de riesgo: Fuga de aceite.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 12. Vista de la delimitación de transformadores eléctricos objeto de estudio en el perímetro urbano de Bogotá.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 13. Mapa de distribución de transformadores eléctricos instalados en redes de distribución objeto de evaluación de riesgo ambiental asociado a PCB's.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 14. Análisis comparativo de las similitudes y diferencias de los modelos cinéticos referenciados.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 15. Modelo general de intercambio de PCB's en las matrices ambientales suelo y atmósfera.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 16. Sistema específico para el modelamiento fisicoquímico del Aroclor 1260 en la matriz atmósfera, producto de una fuga o derrame de aceite dieléctrico con contenido de PCB's en suelo asfaltad.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 17. Mapa de interpolación de temperatura promedio en el perímetro urbano de Bogotá (2008-2016)....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 18. Mapa de interpolación de velocidad y dirección del viento promedio en el perímetro urbano de Bogotá (2008-2016).....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 19. Regresión no lineal multivariable para la estimación de presión del sistema.....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 20. Mapa de distribución de sitios de riesgo en el perímetro urbano de Bogotá.....</i>	<i>89</i>
<i>Figura 21. Mapa de zonas de riesgo representadas en el perímetro urbano de Bogotá.....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 22. Mapa de zonas de riesgo localizadas en el perímetro urbano de Bogotá.....</i>	<i>91</i>
<i>Figura 23. Mapa de caracterización del riesgo de exposición a PCB's.....</i>	<i>93</i>
<i>Figura 24. Mapa de caracterización del riesgo en función de su extensión.....</i>	<i>96</i>
<i>Figura 25. Estructura del grupo de trabajo para la gestión del riesgo de exposición a PCB's.....</i>	<i>99</i>
<i>Figura 26. Línea de comunicación del riesgo de exposición a PCB's.....</i>	<i>104</i>
<i>Figura 27. Modelo de mensaje para la comunicación del riesgo de exposición a PCB's.....</i>	<i>106</i>

Resumen

Los bifenilos policlorados PCB's, prohibidos en 1979 dada su toxicidad y efectos adversos en el ambiente (ASTDR, 2016) fueron un aditivo empleado ampliamente en el sector energético. Codensa S.A. E.S.P posee transformadores de distribución con concentraciones de PCB en aceite dieléctrico, por esto está sujeta a las disposiciones de la Resolución 222 de 2011, que obliga a los propietarios de equipos contaminados a comunicar el riesgo ambiental de los PCB's a la población (MADS, 2011). Sin embargo, la limitación técnica en la cuantificación de dicho riesgo en un área determinada ha retrasado la generación de una estrategia de comunicación del riesgo corporativa. En este estudio se diseñó una metodología semicuantitativa de evaluación del riesgo de exposición por inhalación de PCB's producto del derrame o fuga de aceite dieléctrico con contenido de la sustancia, estructurada desde los criterios de evaluación del Manual de Evaluación y Gestión del Riesgo Asociado a los COP's (MAVDT, 2017), abordando la cuantificación del riesgo ambiental de PCB's mediante el planteamiento de un modelo fisicoquímico del Aroclor 1260, el cual permitió la correlación de las variables temperatura, velocidad y dirección del viento y difusividad en una regresión no lineal multivariable, para predecir la presión parcial del sistema estudiado que describe la transferencia de PCB's desde una fase líquida (aceite) a una fase gaseosa (atmósfera), representando el proceso de volatilización. Al implementar la metodología se estimó que la distancia de distribución del contaminante en la atmósfera en un año es de 49,50 a 577,20 m, se concluyó gracias a la categorización del riesgo que la zona de riesgo prioritaria de riesgo es la zona nororiente de Bogotá (Chapinero Teusaquillo y Barrios Unidos), a partir de esta zona se fundamentaron en 5 lineamientos para la estrategia de comunicación (OPS, 2011), que incluyeron el diseño de un equipo de trabajo interdisciplinario y sus actividades generales coordinadas por la División HSE, el análisis del contexto para el planteamiento de retos y condicionantes socioeconómicos en la socialización, la identificación de públicos destinatarios (tercera edad y universitarios) que justificó la selección de líneas y canales mixtos de comunicación, la planificación de la respuesta y las recomendaciones dirigidas a la preparación organizacional y finalmente la consolidación de un modelo de mensaje que sugiere ser comunicado por medios físicos y electrónicos.

Palabras Clave *Codensa S.A. E.S.P, Metodología de Evaluación de Riesgo Ambiental, Policlorobifenilo, Riesgo de exposición, Modelo Fisicoquímico, Transformador eléctrico.*

Abstract

Electrical industry development promoted the utilization of commercial mixtures of PCB's in dielectric fluids, these substances were restricted in 1979 due to their toxicity and adverse effects on the environment (ASTDR, 2016). Codensa S.A E.S.P has a certain amount of distribution transformes with PCB's concentrations, that is why they must follow Resolution 222 of 2011 provisions, which establishes the environmental risk communication duty (MADS, 2011). However, technical limitation in risk quantification has delayed the generation of a risk communication strategy. In this study, a semiquantitative methodology was designed to assess the risk of exposure by PCB's inhalation caused by the spillage or leakage of dielectric oil containing the substance. This methodology was structured by evaluation criteria from "Manual de Evaluación y Gestión del Riesgo Asociado a los COP's" (MAVDT, 2017), and addressing PCB's environmental risk quantification through the approach of a physicochemical model of Aroclor 1260, which allows the correlation of temperature, speed and wind direction, and diffusivity in a multivariable non-linear regression to predict the studied system's partial pressure, which describes PCB's transference from a liquid phase (oil) to a gas phase (atmosphere) representing the volatilization. When implementing the methodology, distribution distance of the pollutant in the atmosphere in a year was estimated between 49.50 and 577.20 m. It was concluded thanks to risk categorization that the priority risk zone is the northeastern Bogotá zone (Chapinero Teusaquillo and Barrios Unidos), establishing 5 communication guidelines (OPS, 2011) which included an interdisciplinary team and its general activities coordinated by HSE Division design, the context analysis for socioeconomic challenges and socialization conditions approach, the identification of target audiences (third age and university students) that justified the selection of mixed communication channels, response planning and recommendations leads to organizational preparation and finally the consolidation of a message model that suggests being communicated by physical and electronic means.

Key Words *Codensa S.A. E.S.P, Electric Transformer, Environmental risk assessment methodology, Polychlorinated biphenyls, Exposition risk, physicochemical model*

Introducción

Los bifenilos policlorados PCB's son un grupo de más de 209 compuestos clorados, con distintos grados de toxicidad, sintetizados comercialmente desde 1930 en Estados Unidos. Fueron usados ampliamente en la industria energética en el proceso de distribución de energía, principalmente como aditivo del aceite dieléctrico de transformadores, con el fin de mejorar la estabilidad de estos aceites empleados como refrigerantes (Astudillo, 2014).

Aunque la fabricación de este tipo de equipos se suspendió en 1979 en Norteamérica y en 1983 en Europa occidental, todavía existe cierta cantidad de equipos contaminados con PCB's, adquiridos antes de la prohibición de este compuesto, como es el caso colombiano (Posada & Aguirre, 2006).

Los PCB's han sido considerados por la comunidad científica mundial como una amenaza para el medio ambiente y la salud desde 1960, son compuestos tóxicos capaces de producir enfermedades como el cloracné, daños en el hígado, sistema inmunológico, neurológico, y potencialmente cáncer (Andino, 2013). Hacen parte de la lista de compuestos orgánicos persistentes (COP's), lo que implica que se bioacumulan en el ambiente, alcanzando dosis suficientemente altas en los organismos por exposición a largo plazo incluso es pequeñas concentraciones, representando un peligro inminente (Ilyina, 2007).

Como se mencionó anteriormente, los PCB's fueron empleados ampliamente en el sector energético, en Colombia, Codensa S.A. E.S.P. es la mayor distribuidora de energía eléctrica, extendida a lo largo del área metropolitana de Bogotá y otros municipios aledaños ubicados en los departamentos de Cundinamarca, Tolima y Boyacá, supliendo aproximadamente un 24,0% de la demanda nacional en el mercado regulado (Duff & Phelps de Colombia, 2006).

Los equipos de distribución de Codensa S.A E.S.P están siendo identificados y la concentración de PCB's en el aceite dieléctrico está siendo cuantificada en conformidad a la Resolución 222 del 2011 (HSE, 2017). La División Medio Ambiente (HSE) está comprometida con la gestión ambiental en este contexto, por lo que ha planteado como Objetivo Estratégico del 2018, la evaluación del riesgo ambiental asociado a PCB's en transformadores de distribución, para la posterior comunicación del riesgo a la comunidad (A. Jaimes, comunicación personal, 12 de febrero de 2018).

La evaluación del riesgo ambiental (ERA) es la determinación de la naturaleza y probabilidad de que las actividades humanas provoquen efectos indeseables en los ecosistemas y la salud (INE, 2003). Las metodologías de evaluación del riesgo ambiental en general siguen los lineamientos emitidos por la EPA (1998), sin embargo, en el sector productivo, incluyendo la organización Codensa S.A E.S.P, se ha implementado metodologías de carácter cualitativo, que si bien han permitido identificar la existencia y la fuente del riesgo en diferentes escenarios (I&N Enel, 2017), no han permitido estimar el nivel de exposición y los efectos en la salud provocados por las mezclas de PCB's empleadas en el sector eléctrico, retrasando así el planteamiento de una estrategia de comunicación del riesgo (Jaimes, 2018).

En esta investigación se pretende diseñar una metodología para la evaluación y comunicación del riesgo ambiental asociado a PCB's en transformadores eléctricos instalados en las redes de distribución de energía de Codensa S.A. E.S.P, con enfoque cuantitativo, incluyendo el desarrollo de un modelo fisicoquímico de comportamiento de PCB's, que permita visualizar zonas de riesgo prioritarias, apoyar la toma de decisiones de manejo ambiental y formular lineamientos para la comunicación del riesgo.

1 Planteamiento del Problema

Colombia ha avanzado en la consolidación del inventario nacional de bifenilos policlorados (PCB's), un grupo de compuestos organoclorados persistentes de diferente toxicidad empleados hasta 1979 en el sector industrial. Este esfuerzo está direccionado a cuantificar y controlar los progresos alcanzados frente a la identificación y eliminación de equipos y desechos contaminados con el compuesto ^(IDEAM, 2014), en ese contexto, no cabe duda que el sector eléctrico es el sector productivo que más impacta en este inventario (Torres, 2018).

La autoridad ambiental, en el desarrollo del Proyecto Nacional para la Gestión y Eliminación de PCB's en Colombia, desarrolló una serie de documentos que conforman el "Manual para la Gestión Ambiental Integral de Bifenilos Policlorados PCB" (MADS, 2015), este comprende un marco conceptual para el manejo de este compuesto peligroso. A pesar de este logro, el manual no incluye la estandarización o el procedimiento técnico para la evaluación del riesgo ambiental de PCB's, lo que se traduce en el desconocimiento o subestimación de los efectos de este contaminante (Martinez, 2005).

La situación se agrava en la medida que se ha demostrado que incluso en bajas concentraciones, los PCB's implican efectos a la salud a largo plazo, como daños neurológicos, hepáticos, dérmicos e incluso cáncer (ASTDR, 2008). No evaluar el riesgo ambiental de este contaminante podría retrasar la toma de decisiones tendientes a la disminución del riesgo, prolongando la duración y la extensión de la exposición a PCB's en la población y el ambiente.

La autoridad ambiental publicó en el 2007 el Manual de Evaluación y Gestión del Riesgo Asociado a los COP's, (dentro de los cuales se encuentran los PCB's), fundamentado en el marco de trabajo de la Agencia de Protección del Medio Ambiente (EPA). Este manual ofrece una propuesta de cuantificación del riesgo basada en el cálculo de dosis o cocientes de riesgo, que sugieren la toma e interpretación de datos epidemiológicos y en análisis del flujo de las concentraciones de PCB's en las matrices ambientales (Dirección Desarrollo Sectorial Sostenible, 2007). La aplicación exacta de estos métodos presenta algunas dificultades en América Latina, fundamentalmente por el gran número de sitios que deben estudiarse y la escasez de recursos para efectuar estudios con el detalle que requieren estas metodologías (OPS, 1999).

Por otra parte, las metodologías de evaluación de riesgo ambiental planteadas desde el sector productivo usualmente estiman el riesgo de manera cualitativa, valorando parámetros en escalas definidas para categorizar el riesgo inherente a una actividad (AENOR, 2008). Esta situación se presenta en la metodología corporativa de evaluación de riesgo de Codensa S.A. E.S.P, que, si bien ofrece un panorama general del riesgo y sus posibles causas (I&N Enel, 2017), no permite calcular el nivel de exposición a PCB's en el ambiente y las zonas prioritarias de atención.

Por lo tanto, La dificultad en el acceso e implementación de una herramienta que permita evaluar el riesgo ambiental de los PCB's, ha limitado la estimación de la distribución de este contaminante y el nivel de exposición de la comunidad en el área de influencia de las redes de distribución de energía de Codensa S.A E.S.P. Como consecuencia, la organización encuentra una limitación técnica para dar alcance a la disposición de la Resolución 222 de 2011, dirigida al diseño e implementación de una estrategia que permita la comunicación de información oportuna y verás acerca del riesgo ambiental asociado a PCB's, sustancia que se encuentra presente en un porcentaje conocido de sus transformadores de distribución eléctrica.

2 Justificación

La situación expuesta anteriormente, amerita realizar una aproximación de la distribución de PCB's en la atmósfera mediante un modelo fisicoquímico, que relacione las propiedades químicas del contaminante con variables ambientales que pueden determinar su comportamiento. Así, un modelo fisicoquímico constituye una herramienta para la cuantificación del riesgo en el diseño de una metodología de evaluación, entendiendo la cuantificación del riesgo como la estimación del alcance de la exposición humana a PCB's por inhalación (Baird, 2004).

Además del enfoque fisicoquímico en la evaluación del riesgo ambiental, el diseño metodológico adapta los puntos principales de algunas metodologías de evaluación, inspiradas en los lineamientos tradicionales estadounidenses (ASTDR y EPA), al contexto productivo de Codensa S.A. E.S.P. De esta forma, con base a la revisión desarrollada, este proyecto representaría la primera metodología semicuantitativa de evaluación de riesgo ambiental de PCB's en el sector eléctrico colombiano, aplicada a una organización que cuenta con el 24% de la participación en el mercado energético nacional (Codensa, 2015).

Esta situación fundamenta la calidad de la herramienta metodológica diseñada en este estudio, cuyos resultados no pueden ser obtenidos a partir de metodologías cualitativas, esto justifica el aporte de esta investigación desarrollada desde el perfil de la ingeniería ambiental, caracterizada por la visión integral en el diseño de soluciones, en este caso, se integran diferentes dimensiones como los criterios de evaluación del riesgo ambiental, la aplicación de principios fisicoquímicos, el uso de herramientas de análisis geostatístico y las necesidades sociales para la comunicación del riesgo.

El impacto de este proyecto a nivel nacional se justifica en la medida que el diseño metodológico de evaluación ambiental de riesgo asociado a PCB's en transformadores eléctricos instalados en las redes de distribución de energía de Codensa S.A. E.S.P, puede comprender un marco teórico y práctico para la evaluación del riesgo ambiental de este contaminante en el sector productivo en cuestión u otros sectores que integren en su proceso transformadores eléctricos, como el sector minero.

A nivel organizacional, la materialización de este proyecto significa el acceso a una herramienta que permite visualizar la distribución del riesgo asociado a PCB's en el perímetro urbano de Bogotá, estableciendo las zonas prioritarias de posible exposición al contaminante, dada la fuga o derrame de aceite dieléctrico con contenido de PCB's. Este es el insumo principal para la definición del enfoque de la estrategia de comunicación del riesgo (OPS, 2011), un requisito legal según la Resolución 222 de 2011, el cual no ha sido gestionado por la organización.

El avance en la compañía en relación al manejo del riesgo ambiental asociado a PCB's, se evidenciará en la medida que una vez implementada la metodología propuesta, se da por finalizada la primera fase del análisis de riesgo ambiental, dando inicio a la fase de gestión del riesgo, la cual incluye la toma de decisiones, y la comunicación del riesgo como compromiso social y legal (ILSI, 2012). Finalmente, la implementación del resultado de este estudio beneficiará la planeación de Codensa S.A. E.S.P, direccionando la gestión de recursos de manera eficiente con base en el riesgo ambiental identificado, estableciendo medidas de manejo ambiental y comunicación pertinentes según el panorama establecido, lo cual impacta positivamente la calidad de vida de sus clientes.

3 Pregunta problema

¿Cuál es la metodología semicuantitativa de evaluación de riesgo ambiental asociado a los transformadores eléctricos contaminados con PCB's instalados en las redes de infraestructura de distribución de energía de Codensa S.A E.S.P, que permita visualizar las zonas de riesgo prioritarias para la generación de los lineamientos de la estrategia de comunicación del riesgo?

4 Objetivos

4.1 Objetivo General

Diseñar una metodología para la evaluación y comunicación del riesgo ambiental asociado a PCB's en transformadores eléctricos instalados en las redes de distribución de energía de Codensa S.A. E.S.P en Bogotá, Colombia.

4.2 Objetivos Específicos

- Correlacionar criterios de evaluación de riesgo con variables fisicoquímicas empleadas en el modelamiento del comportamiento de los PCB's, para la estructuración del diseño metodológico de evaluación del riesgo ambiental asociado a este contaminante.
- Evaluar el modelo preliminar del comportamiento fisicoquímico de los PCB's en la metodología de la evaluación del riesgo diseñada.
- Proponer lineamientos iniciales para la estrategia de comunicación del riesgo ambiental que fortalezcan la gestión ambiental integral de equipos y desechos que consisten, contienen o están contaminados con Bifenilos Policlorados (PCB).

5 Marcos de Referencia

5.1 Antecedentes

Los policlorobifenilos (PCB's) fueron usados por primera vez en Alemania en 1881 debido a sus propiedades químicas ideales para la refrigeración de transformadores eléctricos, sin embargo, a partir del año 1979 este compuesto fue sujeto de control debido a su naturaleza peligrosa (Ritter, Solomon, Forget, Stemeroff, & Leary, 1995) en Colombia se prohibió su fabricación e importación en este año, y en Sudamérica fue completamente restringido en 1986 (Valero & Tusso, 2017).

En relación con la industria energética, los dispositivos que tienen PCB's pueden sufrir escapes a medida que envejecen, derrames accidentales durante su transporte, e incluso incendios, constituyendo fuentes de exposición de riesgo una vez introducidos en la matriz ambiental (Valero & Tusso, 2017), donde se bioacumulan debido a la característica no polar de la molécula de PCB, propiciando su solubilidad en grasas (Astudillo, 2014).

Transformadores eléctricos que emplean aceites con contenidos de PCB's todavía se encuentran instalados en redes colombianas de infraestructura y distribución energética, pues la vida útil de los equipos es alrededor de 25 a 35 años (Gía & Frías, 2017). Se reconoce en el país un inventario estimado de 9.771 a 12.803 toneladas de PCB's en uso, siendo así Colombia uno de los países con mayores reservas de la sustancia (Vaca, García, & Juan, 2013).

En el camino hacia la gestión ambiental integral de los residuos contaminados con PCB's, Colombia lleva un recorrido que inició con la aprobación del Convenio de Basilea, mediante la Ley 253 de 1996 del Congreso de la República, donde se estableció a esta sustancia como desecho peligroso objeto de control de movimiento transfronterizo.

Nueve años más tarde se aprobó el Convenio de Estocolmo mediante la Ley 994 de 2005, dirigida a la eliminación del uso de equipos contaminados con PCB's antes del 2025, y se emitió el Decreto 4741 de 2005 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT) sobre la prevención y el manejo de los residuos o desechos peligrosos en el marco de la gestión integral, indicando la obligación del fabricante o importador a comunicar el riesgo de estos. Finalmente, la Resolución 222 de 2011 y la Resolución 1741 de 2016 expedida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), fijaron plazos para la identificación, muestreo, y análisis de PCB's en equipos y residuos.

La organización cuenta con una estructura de tipificación de 89% de equipos en uso, 4,7% en desuso y 6,3% equipos desechados (Codensa, 2016). Enmarcados en este contexto y dando cumplimiento a la gestión ambiental integral de residuos y equipos contaminados con PCB's, Codensa S.A. E.S.P realiza la compra del aceite dieléctrico desde el año 1979 en Estados Unidos, y desde 1986 en otros países, con proveedores que certifican la manufactura libre de PCB's en sus productos (Codensa, 2016).

Posteriormente, se inició en el año 2012 la identificación de transformadores y el muestreo del aceite dieléctrico de los mismos para identificar concentraciones de PCB's, de acuerdo con los protocolos del IDEAM. En 2016 se superó la meta establecida en la Resolución 222 de 2011, con la identificación del 31,7% del inventario, lo que corresponde al marcado de 21.512 de 67.841 transformadores eléctricos (Codensa, 2016).

En cuanto al manejo de residuos, la organización venía exportando sus residuos contaminados con PCB's hacia países como España y Finlandia; sin embargo, en convenio con la empresa colaboradora

LITO y OCADE, se dio inicio desde 2016 al proyecto de lavado por ultrasonido de las partes sólidas de los equipos, exportando únicamente el aceite residual. Actualmente se trabaja la técnica de declorinación para tratar dicho aceite (Codensa, 2016).

Según el inventario del IDEAM, en el año 2015, Colombia debía eliminar aproximadamente 2.003,7 toneladas de equipos y desechos contaminados. En el 2016, Codensa S.A. E.S.P contribuyó con la eliminación de 82 toneladas, de las cuales 64 se gestionaron en el país con la técnica de lavado por ultrasonido (Codensa, 2016).

A pesar del avance en la gestión ambiental integral de los equipos y residuos contaminados con PCB's, la evaluación del riesgo ambiental es una actividad que aún no ha sido consolidada en la organización, sin embargo, el compromiso con la comunicación del riesgo de este contaminante se ha direccionado a difundir recomendaciones para la manipulación de transformadores al personal de mantenimiento, con el fin de prevenir el riesgo ocupacional, y por otra parte se han definido a grandes rasgos algunos puntos claves para la futura estrategia de comunicación del riesgo (Jaimes, 2018).

Es por esto que en el ejercicio de la gestión integral, Codensa S.A. E.S.P propone en el año 2018 la iniciativa de elaborar una metodología de evaluación del riesgo ambiental que permita estimar la distribución del riesgo en el área de influencia de sus redes de distribución, acotado al perímetro urbano de Bogotá como primer escenario de prueba de la metodología diseñada, y así obtener resultados de primera mano, que permitan elaborar una estrategia de comunicación del riesgo con información confiable para la población más expuesta (Jaimes, 2018).

Para lograr esta estimación, se sugiere el diseño y aplicación de modelos fisicoquímicos del contaminante, ya que el muestreo de PCB's sugiere que las concentraciones atmosféricas son causadas principalmente por un gran número de fuentes bastante pequeñas (Diefenbacher, Gerecke, Bogdal, & Hungerbühler, 2016). En este sentido, es importante destacar que no se han planteado este tipo de herramientas en la evaluación del riesgo ambiental de exposición a PCB's en el contexto productivo colombiano, por lo que el diseño metodológico propuesto fundaría un primer antecedente en el uso de modelos de comportamiento fisicoquímico de un contaminante como los bifenilos policlorados en la evaluación del riesgo ambiental. En el siguiente apartado se presentan los autores consultados y las distintas investigaciones en torno a la cuantificación de la distribución de PCB's empleando modelos.

5.2 Estado del Arte

En este apartado se muestra la revisión de artículos científicos dirigidos a la cuantificación de niveles de PCB's, así como su distribución en matrices ambientales a nivel local, regional o global, mediante modelos y metodologías, resaltando el aporte de estos estudios a la evaluación del riesgo ambiental.

Tabla 1. Revisión de artículos dirigidos al modelamiento de PCB's en el ambiente.

Año	Autor	Título	Aporte a la evaluación de riesgo ambiental
2018	Lang & et al.	Assessing PCB pollution in the Baltic Sea - An equilibrium partitioning based study	Muestra la investigación exhaustiva de exposición, destino, partición, biodisponibilidad y toxicidad inicial de los PCB's seleccionados, y la evaluación de las características de los sedimentos por muestreo de equilibrio.
2017	Huo & et al.	Historical record of polychlorinated biphenyls (PCBs) and special occurrence of PCB 209 in a shallow fresh-water lake from eastern China	Análisis del registro histórico de PCB en sedimentos del lago Chaohu, con el fin de reconstruir el tiempo, los tipos y la gravedad de la contaminación histórica de PCB's y su relación con actividades humanas.
2017	Wang & et al.	Ecological and health risk assessment of PAHs, OCPs, and PCBs in Taihu Lake basin	A partir de datos medidos de la fuente centralizada de agua potable y los datos históricos, se evaluó el riesgo de los HAP, OCP y PCB en una cuenca, de acuerdo con los estándares de calidad ambiental en sedimentos de la USEPA.
2017	Grech, & et al.	Toxicokinetic models and related tools in environmental risk assessment of chemicals	Estado del arte de herramientas y modelos toxicocinéticos de última generación que se han aplicado a especies terrestres y acuáticas relevantes para la evaluación de riesgos ambientales de los productos químicos.
2016	Cortés & et al.	Environmental variation of PCDD/Fs and dl-PCBs in two tropical Andean Colombian cities using passive samplers	Interpreta de datos pasivos de muestreo de aire de PCDD, PCDF y dl-PCB de Manizales y Bogotá para identificar posibles fuentes de contaminación y la influencia de variables meteorológicas en su dinámica.
2016	Cui & et al.	Spatial-temporal variation, possible source and ecological risk of PCBs in sediments from Songhua River, China: Effects of PCB elimination policy and reverse management framework	Evalúa la distribución espaciotemporal y perfiles de PCB en los sedimentos del río Songhua, identifica características de variación y posibles fuentes de PCB, evalúa riesgos ecológicos de los sedimentos contaminados; y establece un marco conceptual de gestión inversa para los PCB.
2016	Diefenbacher & et al.	Spatial Distribution of Atmospheric PCBs in Zurich, Switzerland: Do Joint Sealants Still Matter?	Además de reportar las concentraciones atmosféricas de PCB medidas en el entorno de un complejo de viviendas, se emplea un modelo de difusión Gaussiano para calcular las emisiones anuales de PCB para un complejo de viviendas.
2010	Li & et al	Polychlorinated Biphenyls in Global Air and Surface Soil: Distributions, Air-Soil Exchange, and Fractionation Effect	Se investigó el estado de equilibrio de los PCB en el sistema aire-suelo para China, Reino Unido, Europa central y meridional y un transecto latitudinal del al sur del Reino Unido al norte de Noruega, con base a estudios disponibles. El estudio de estado de equilibrio suelo-aire se expresó como la fracción de fugacidad suelo-aire, para diferentes homólogos de PCB.

Fuente: Autor, 2018.

Tabla 2. Revisión de artículos dirigidos al modelamiento de PCB's en el ambiente.

Año	Autor	Título	Aporte a la evaluación de riesgo ambiental
2010	Viener & et al.	Regression Model of Partial Pressures of PCBs, PAHs, and Organochlorine Pesticides in the Great Lakes' Atmosphere	Combina parámetros ambientales en un modelo de regresión lineal múltiple para predecir la presión parcial atmosférica de PCB's basado en tiempo de muestreo, temperatura atmosférica, población, velocidad del viento y dirección del viento en el muestreo sitio.
1997	Finizio & et al.	Octanol-Aair Partition Coefficient as a Predictor of Partitioning of Semi-Volatile Organic Chemicals to Aerosols	Sugiere que la relación Kow/Kaw puede ser estimada, donde (Kow) es el coeficiente de partición octanol-agua y (Kaw) es el coeficiente de partición aire-agua. Comprende un modelo de comportamiento atractivo por su simplicidad.
1995	Herner & et al.	Model of Long Term Exchange of PCB's between Soil and the Atmosphere in the Southern U.K	Formular un modelo que calcula las concentraciones y fugacidades en el suelo y aire, así como la dirección y magnitud del flujo neto de PCB entre el aire y el suelo, haciendo una predicción de la vida media de PCB's en el ambiente.

Fuente: Autor, 2018.

El modelamiento de PCB's en agua, suelo, atmósfera, y su intercambio entre estas matrices, ha sido estudiado desde diferentes enfoques, empleando principios fisicoquímicos como la fugacidad y el coeficiente de partición para la descripción del comportamiento de estas sustancias.

Las mediciones de PCB's in situ, han permitido la asociación de diferentes variables ambientales en la descripción de la distribución del contaminante en el entorno, generando aproximaciones de balances de masa y la determinación de la difusividad en el medio. El reporte de estos resultados a menudo se realiza como sumatorias de congéneres de bifelinos policlorados (Σ PCB), lo que dificulta la comprensión del comportamiento de un congener o mezcla comercial específica.

En relación con la evaluación del riesgo ambiental, estos modelos generalmente han sido una herramienta para la cuantificación de PCB's en sedimentos y especies acuáticas, y con menor frecuencia se han aplicado para la cuantificación de la exposición humana por inhalación. Así, desde el enfoque de este tipo de estudios, si bien se modela el comportamiento de la sustancia en el ambiente, pocas veces se evalúa el riesgo a la salud humana.

Por esta razón, vale la pena incorporar en una evaluación de riesgo ambiental, una aproximación de la distribución de PCB's en la atmósfera mediante un modelo fisicoquímico que permita la aplicación de sus resultados al análisis de la exposición humana a través de la inhalación como vía de entrada del contaminante.

5.3 Marco Teórico

Según la Confederación Empresarial de la Provincia de Alicante (COEPA), (2007), en los últimos años el sector industrial ha experimentado un importante desarrollo, no sólo en la cantidad de industrias, sino también en la diversidad de procesos productivos. Esto ha aumentado la incertidumbre de los riesgos producidos por la actividad productiva (Porta, & et al, 2008), entre ellos, el riesgo ambiental, lo que hace necesario el empleo de herramientas que permitan evaluarlo, con el objetivo de disminuir riesgos potenciales (Marhavidas, Koulouriotis, & Gemini, 2011).

El **riesgo ambiental** puede ser definido como la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno que afecta directa o indirectamente al medio ambiente, esto constituye un peligro ambiental al que pueden estar expuestos sus elementos fundamentales, entre ellos, la población (COEPA, 2007).

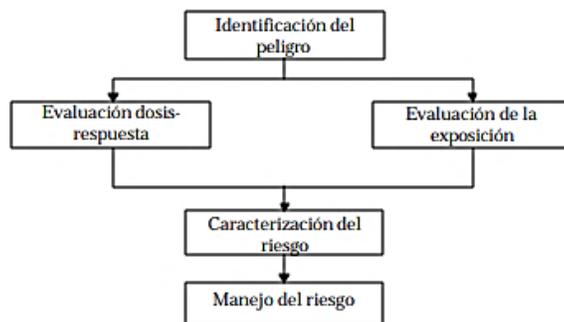
En ese sentido, de acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), la **salud ambiental** comprende aquellos aspectos de la salud humana, incluida la calidad de vida, que están determinadas por factores físicos, químicos, biológicos, sociales y psicosociales en el ambiente. Para garantizar la salud ambiental, se debe promover la valoración, corrección y prevención de los factores que puedan potencialmente afectar negativamente la salud de las generaciones presentes y futuras (INS, 2018).

Para la valoración de estos riesgos ambientales se implementa la evaluación de riesgos como una herramienta de estimación y jerarquización de la importancia ambiental de un factor, como por ejemplo un contaminante, calculando cuantitativamente los impactos negativos a la salud o a los ecosistemas derivados de la exposición ambiental (INE, 2003).

La Agencia Federal para la Protección Ambiental (EPA) se convirtió en la primera agencia en adoptar **directrices formales en la evaluación de riesgo** de carcinogénesis producto de la exposición a pesticidas en 1976. El primer paso definido por esta directriz fue la determinación de la correlación de la exposición a la sustancia y su enfermedad asociada, mientras el segundo paso consistió en la determinación de qué acción reguladora, de ser necesaria, debía tomarse para reducir el riesgo (NAS, 1983).

En el año 1983, la Academia Nacional de Ciencias de Estados Unidos (NAS), realizó una primera publicación sobre la evaluación de riesgos en el gobierno federal y la gestión del proceso, estableciendo la estructura detallada para la evaluación de riesgos como se muestra en la *Figura 1*, descrita brevemente a continuación.

Figura 10. Estructura Metodológica de la Evaluación de Riesgos



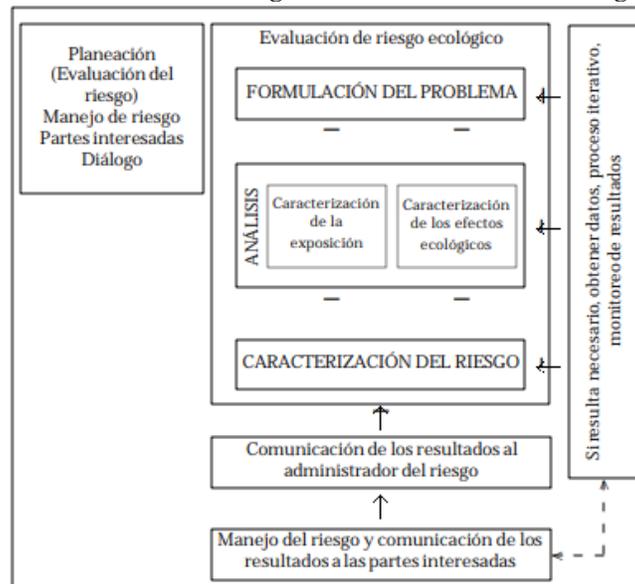
Fuente: (NAS, 1983)

Según esta academia, la evaluación de riesgo comprende una secuencia lógica que inicia con la identificación de peligros, en la cual se determina si un producto químico particular es causal de efectos a la salud, en segundo lugar, se desarrolla la evaluación dosis-respuesta, para conocer la relación entre la magnitud de la exposición y la probabilidad de ocurrencia de dichos efectos, en tercer lugar, se evalúa la exposición, en la cual se determina precisamente el alcance del ser humano a la exposición antes o después de la aplicación de controles regulatorios (NAS, 1983). El último paso de esta secuencia es la caracterización del riesgo, donde se describe la naturaleza y, a menudo, la magnitud del riesgo a la salud humana incluyendo la incertidumbre del cálculo. Este paso es uno de los más relevantes, en la medida que al riesgo se le asocia una probabilidad y una consecuencia (NAS, 1983).

La NAS (1983) afirmó en su publicación que, si bien diferentes agencias habían generado estructuras de evaluación de riesgo, como la EPA, la Agencia para la Administración de Comida y Medicamentos (FDA), la Comisión para la Seguridad de los Productos de Consumo de los Estados Unidos (CPSC) y la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (OSHA); se evidenciaba la necesidad de generar lineamientos uniformes para abordar la evaluación de riesgos.

Dada esta situación, la EPA, publicó el **marco de trabajo para la evaluación del riesgo ecológico** en 1992, que se resume en la *Figura 2*. Este proceso comenzó en 1991 con el análisis de evaluaciones de riesgo existentes, con el objetivo de desarrollar una base que articulara principios rectores para la evaluación de riesgos ecológicos con la participación de expertos en ecotoxicología (EPA, 1992).

Figura 11. Estructura metodológica de la evaluación del riesgo ecológico



Fuente: (EPA, 1992).

Según este marco, la evaluación del riesgo ecológico se aborda desde una primera fase definida como la formulación del problema, ésta incluye una caracterización preliminar de exposición y efectos, políticas, asuntos regulatorios y factores específicos del sitio, la definición de la viabilidad, y el alcance y objetivos de la evaluación del riesgo ecológico. Además, el nivel de detalle y la información que serán necesaria para completar la evaluación también deben ser determinadas en esta primera (EPA, 1992).

La segunda fase del marco se denomina análisis y consiste en dos actividades, la caracterización de la exposición y la caracterización de los efectos ecológicos. El propósito de la caracterización de la exposición es predecir o medir la distribución espacial y temporal de un factor estresante y su coincidencia o contacto con los componentes ecológicos, mientras que el propósito de la caracterización de los efectos ecológicos es identificar y cuantificar los efectos adversos provocados por un estresante y, en la medida de lo posible, evaluar relaciones de causa y efecto (EPA, 1992). La última fase es la caracterización del riesgo, en la cual se utilizan los resultados de la exposición y el análisis de efectos ecológicos para evaluar la probabilidad de las reacciones adversas en el ambiente asociados con la exposición a un estresante, incluyendo sus patrones espaciales y temporales, proporcionando un cuadro completo del análisis y resultados (EPA, 1992).

A partir de este marco de trabajo, en el año 1998, surgen los **lineamientos para la evaluación del riesgo ecológico**, propuestos por la Agencia para la Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, 1992), organización que lidera la evaluación del riesgo, y gracias a la cual se han generado y adaptado metodologías de evaluación del riesgo para diversos contaminantes (Andino, 2013). Siguiendo los lineamientos propuestos por la EPA, Colombia expide el Manual de Evaluación y Gestión del Riesgo Asociados a los Compuestos Orgánicos Persistentes COP's en el año 2007 (Dirección Desarrollo Sectorial Sostenible, 2007), que aborda implícitamente el riesgo asociado a PCB's, ya que esta sustancia pertenece a este grupo dada su naturaleza química (Cui, & et al, 2016).

Según el Instituto de Investigación HydroQuebec, (1988), las agencias reguladoras han comenzado a utilizar métodos más cuantitativos para determinar los riesgos relativos asociados con los niveles residuales de contaminación encontrados después de un derrame o liberación ambiental como un transformador de PCB o falla del capacitador.

Así, la Escuela International Max Planck para Asuntos Marinos de la Universidad de Hamburg argumenta que se han desarrollado modelos espaciales para simular el transporte y la deposición de contaminantes como partículas de aerosol, metales pesados o partículas en suspensión en la atmósfera desde el océano. La resolución espacial y temporal de tales modelos es relativamente alta y se pueden adaptarse para el modelado de COP's, incorporando procesos adicionales en su ciclo (Ilyina, 2007). La simulación del transporte de contaminantes se introdujo en el año 1901 por G.N. Lewis, utilizando el concepto de fugacidad como un criterio de equilibrio, el cual ha demostrado ser un método conveniente y elegante para calcular el balance de partición (McKay, 2001).

Donald McKay ha realizado análisis cuantitativos del transporte atmosférico de contaminantes, y es un referente para el diseño de modelos fisicoquímicos, este autor expresa que las sustancias están sujetas a la ley de conservación de masa (Baird, 2004), es decir, que existe un balance de masa para cada sustancia química, determinada por su cantidad, concentración o flujos. Este principio del balance se expresa mediante ecuaciones matemáticas para cuantificar las entradas y salidas de la sustancia en el ambiente (McKay, 2001).

El enfoque científico básico para la utilización de técnicas cuantitativas en la evaluación de riesgos toxicológicos puede describir escenarios de riesgo mediante supuestos (Hydro-Quebec Research Institute, 1988). Por esta razón, los modelos fisicoquímicos pueden ser una herramienta cuantitativa para la cuantificación de riesgos en la evaluación del riesgo ambiental, cuyas variables dependen del contaminante y la matriz que se desea analizar. En este sentido se han realizado diferentes estudios que describen la distribución de PCB's en el ambiente y el comportamiento de este compuesto químico en las matrices ambientales o en sistemas cerrados, como se mostró en la *Tabla 1*.

Algunos modelos más complejos analizan la dinámica de bioacumulación, y el aumento de la concentración de un contaminante en el medio ambiente desde el primer organismo en una cadena alimentaria (Ilyina, 2007). El Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente PNUMA ha iniciado acciones para compartir información, evaluar y monitorear estrategias de minimización del riesgo, preparar inventarios de PCB's y evaluar la capacidad para la eliminación de esta sustancia (PNUMA, 2002), para lo cual se requieren criterios de evaluación de los riesgos ambientales planteados para los COP's con una base científica sólida y modelos de distribución del contaminante (Hydro-Quebec Research Institute, 1988).

5.4 Marco Conceptual

5.4.1 Residuo

Según las bases conceptuales de la Guía Integral de Residuos o Desechos Peligrosos del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia, se define residuo o desecho, como sinónimos de la siguiente manera: “Aquello que queda después de haber escogido lo mejor y más útil de algo, cosa que, por usada o por cualquier otra razón no sirve a la persona para quien se hizo. Aquello que resulta de la descomposición o destrucción de algo. Material que queda como inservible después de haber realizado un trabajo u operación” (Dirección de Desarrollo Sectorial Sostenible, 2007).

5.4.2 Residuo Peligroso

Hacia el año 2005, el Centro Coordinador del Convenio de Basilea para América Latina y El Caribe, definió residuo peligroso como todo residuo que debido a su peligrosidad intrínseca (tóxico, corrosivo, reactivo, inflamable, explosivo, infeccioso, ecotóxico), pueden causar daños a la salud o al ambiente. La definición de residuo o desecho peligroso está basada en las características intrínsecas de peligrosidad del residuo para la salud o el ambiente y en la no posibilidad de uso por parte del generador que lo produjo (Martinez, 2005).

5.4.3 Transformador Eléctrico de Distribución

Avelino (2001), en su libro Transformadores de Distribución: Teoría, Cálculo y Pruebas, define un transformador como un aparato eléctrico que por inducción electromagnética transfiere energía eléctrica de uno o más circuitos, a uno o más circuitos a la misma frecuencia, usualmente aumentando o disminuyendo los valores de tensión y corriente eléctrica (Avelino, 2001).

Es decir que este equipo electromagnético estático logra conseguir una mayor o menor tensión alterna en la salida, a partir de otra tensión alterna que va conectada a su entrada. Los transformadores de distribución son utilizados para reducir la tensión trifásica en redes de distribución eléctrica a tensión de consumo domiciliaria, principalmente en áreas metropolitanas y para aplicaciones industriales (TTE, 2017). Dichos transformadores se fabrican en potencias desde 5 kVA hasta 167 kVA monofásicos y desde 15 kVA hasta 500 kVA trifásicos, cumpliendo con las normas NTC, ANSI, IEC (MAGNETRON, 2018).

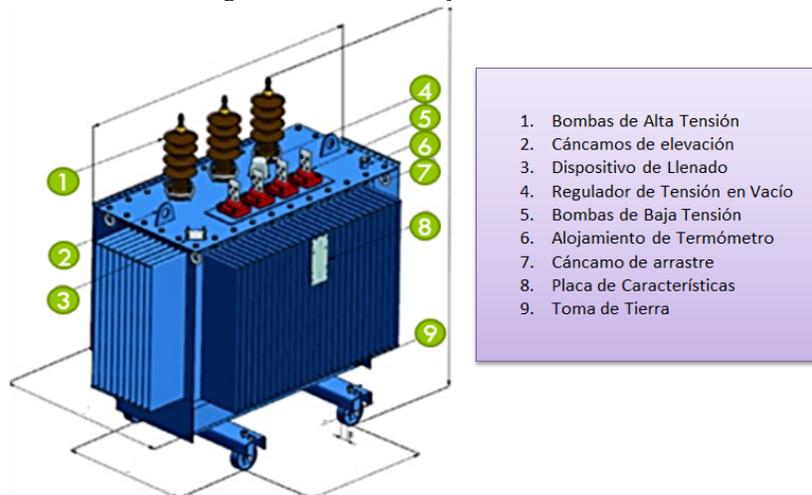
La parte activa del transformador está compuesto por la bobina primaria, secundaria y el núcleo magnético. La bobina primaria se compone de cable de cobre enrollado en el núcleo magnético, la corriente entrante de alta tensión alterna fluye a través del cable, generando un flujo magnético que desarrolla un campo en las bobinas secundarias (Andrews, 2018).

Este campo magnético se genera en la bobina secundaria gracias al núcleo, el cual induce una alta corriente de baja tensión alterna en la cinta. Los equipos pueden conseguir ya sea una mayor o menor tensión alterna en su salida a partir de otra tensión alterna que va conectada a su entrada. Sin embargo, los transformadores de distribución son utilizados para reducir la tensión trifásica en redes de distribución eléctrica a tensión de consumo domiciliaria, principalmente en áreas metropolitanas y aplicaciones industriales (TTE, 2017).

Las partes activas del transformador se encuentran protegidas en un tanque de acero sellado. El espacio libre se llena con aceite mineral no conductor inerte, que sirve de refrigerante y aislamiento, en el que se sumerge el conjunto de la bobina de núcleo (Avelino, 2001). El 30% del volumen del transformador corresponde a fluido aislante, mientras el 70% del transformador comprende partes sólidas, de las cuales 3% es material poroso y el 67% son partes metálicas (TREDI, 2018).

Una vez sellado, el tanque puede ser instalado en un poste de electricidad o en una base de concreto de acero revestido colocado bajo la tierra. (Andrews, 2018). La estructura general de un transformador de distribución se muestra en la *Figura 3*.

Figura 12. Estructura general de un transformador de distribución de Energía



Fuente: Adaptado de (CODENSA, 2018)

5.4.4 Fluido dieléctrico

Así mismo Avelino (2001), conceptualiza sobre el fluido dieléctrico afirmando que los transformadores poseen una serie de materiales aislantes, los cuales conforman el sistema de aislamiento, uno de estos es el fluido líquido dieléctrico, que puede ser aceite mineral, aceite de siliconas o r-temp, que baña las bobinas, el núcleo y los materiales aislantes sólidos para proveer rigidez dieléctrica, enfriamiento eficiente y protección al sistema sólido aislante (Avelino, 2001).

Para el análisis de PCB's en fluido dieléctrico, relacionados al cumplimiento de la normatividad colombiana, se emplean métodos cuantitativos basados en la norma ASTM 4059, ASTM D-6160 o IEC-61619. La cromatografía de gases es el método para análisis cuantitativo en Colombia, según el procedimiento de la norma ASTM 4059, definida en la Resolución 222 de 2011 (TREDI, 2018).

5.4.5 Compuestos orgánicos persistentes (COP's)

Fueron definidos por el Programa Internacional de Seguridad Química (IPCS), en el marco del Programa Interinstitucional para la Gestión Racional de Productos Químicos (IOMC), en el cual se incluye los PCB's como compuestos orgánicos persistentes (OMS, 1976).

Los compuestos orgánicos persistentes son un grupo de compuestos químicos que en diferente medida resisten a la degradación fotoquímica, química y bioquímica; lo que causa que su vida media sea elevada en el ambiente. Algunos de estos compuestos, como los PCB's, pueden persistir en el medio ambiente por periodos de años y puede bioconcentrarse por factores de hasta 70,000 veces (Ritter, Solomon, Forget, Stemeroff, & Leary, 1995).

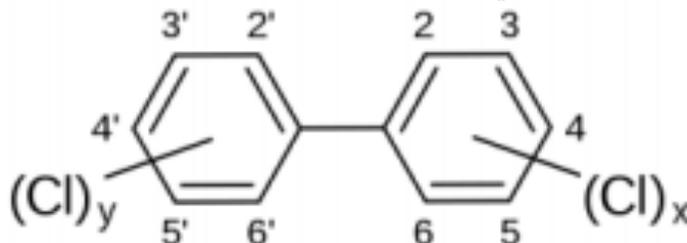
Lo más importante es el hecho de que la elevada lipofilia de estos compuestos determina que probablemente los COP se acumulen, persistan y se bioconcentren, y puedan de esta manera alcanzar niveles toxicológicamente importantes aun cuando la exposición discreta pueda parecer limitada. (Ritter, Solomon, Forget, Stemeroff, & Leary, 1995)

5.4.6 Bifenilos Policlorados (PCB's)

La Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ASTDR) hace referencia a los PCB's, como mezclas de hasta 209 compuestos clorados sintetizados artificialmente, son líquidos aceitosos o sólidos, desde incoloros a amarillo claro. Se han usado ampliamente como refrigerantes y lubricantes en transformadores, condensadores y otros equipos eléctricos, ya que no se incendian fácilmente y son buenos aislantes (ASTDR, 2016).

los PCB's son compuestos aromáticos formados de tal manera que los átomos de hidrógeno en la molécula bifenilo (2 anillos bencénicos unidos entre sí por un enlace único carbono-carbono) pueden ser sustituidos por hasta diez átomos de cloro (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2011). Su estructura molecular se presenta en la *Figura 4*.

Figura 13. Estructura molecular de los bifenilos policlorados PCB's



Fuente: (Lopera & Aguirre, 2006)

Los nombres de los PCB están clasificados según la IUPAC en tres tipos; homólogos, congéneres y mezclas; los homólogos se refieren al nombre general de un PCB dependiendo del número de átomos de cloro que este posea (por ejemplo pentaclorobifenilo), los congéneres indican la posición de cada átomo de cloro dentro de la molécula (por ejemplo 2,2',3,3',4,4',5,6'-Octaclorobifenilo) y las mezclas se refieren a nombres comerciales (por ejemplo Aroclor 1260) donde los dos primeros números indican la cantidad de átomos de carbono presentes en la molécula y los dos últimos indican el porcentaje en peso de cloro que contiene dicha molécula (Lopera & Aguirre, 2006).

Entre los efectos que han sido asociados con la exposición a altos niveles de bifenilos policlorados se incluyen una condición parecida al acné en adultos y alteraciones neurológicas e inmunológicas en niños; además se sabe que causan cáncer en animales y se ha encontrado esta sustancia en por lo menos 500 de los 1,598 sitios de la Lista de Prioridades Nacionales identificados por la Agencia de Protección del Medio Ambiente de EE. UU. (EPA) (ASTDR, 2016).

5.4.7 Residuo o desecho con PCB's

El Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, también define qué son los residuos o desechos con PCB's, haciendo referencia a todos aquellos elementos, sustancias, fluidos, materiales y equipos que se descartan, rechazan o entregan, entre otros, en cualquier estado que contengan PCB en una concentración igual o superior a 50 ppm, así como cualquier otro material o elemento que entre en contacto directo con estos en alguna actividad, incluida la ropa de trabajo (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2011).

Sería importante destacar que el riesgo evaluado en el diseño metodológico incluye transformadores cuyo aceite dieléctrico alcanza concentraciones inferiores a 50ppm, basado en que incluso en bajas concentraciones, si la exposición se genera a largo plazo, los PCB's representan un riesgo ambiental (ASTDR, 2016).

5.4.8 Riesgo

Según la Organización Panamericana de la Salud, la Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades ASTDR, (1992) define al riesgo como la probabilidad de daño, enfermedad o muerte bajo circunstancias específicas. Puede expresarse en términos cuantitativos de probabilidad. En muchos casos el riesgo sólo puede describirse cualitativamente como alto, bajo o insignificante (Organización Panamericana de la Salud, 2006).

5.4.9 Evaluación del Riesgo Ambiental

Denominado (ERA) es la determinación de la naturaleza y probabilidad de que las actividades humanas provoquen efectos indeseables en los ecosistemas, como por ejemplo la generación de materiales o sustancias peligrosas (INE, 2003). Según la Agencia Federal para la Protección Ambiental, la evaluación de riesgo ecológico se define como un proceso que evalúa la probabilidad de que los efectos ecológicos puedan ocurrir como resultado de la exposición a uno o más estresores (EPA, 1992).

Un riesgo no existe a menos que el factor estresante tenga la capacidad inherente de causar uno o más efectos adversos sobre el componente ecológico (organismos, poblaciones, comunidades o ecosistemas) el tiempo suficiente y con una intensidad suficiente para provocar el efecto adverso identificado. Así, la evaluación de riesgos puede evaluar uno o varios estresores y componentes ecológicos (EPA, 1992).

5.4.10 Zona de Riesgo

La Resolución 222 del 2011, establece prioridades en la identificación y eliminación de uso de PCB's como medida de reducción del riesgo. La priorización de las medidas necesarias para identificar y eliminar el uso de equipos contaminados con PCB's se realiza en función de "zonas" como plantas de tratamiento de agua para consumo humano, plantas de beneficio animal. Plazas de mercado, industrias de alimentos y farmacéuticas, restaurantes y zonas de comida en centros comerciales, hospitales e instituciones educativas (MADS, 2011).

5.4.11 Modelo Físicoquímico

Un modelo es una herramienta para el diseño y análisis de un proceso o sistema de control, su función es la predicción del comportamiento dinámico del mismo, mediante la relación funcional entre variables que explican el fenómeno. Sin embargo, no es imposible capturar perfectamente todos los detalles del comportamiento real del proceso de forma matemática (Hurtado, 2006).

Una rama de la fisicoquímica que aplica principios para la modelación del comportamiento de la materia es la termodinámica, ya que permite la descripción de la transformación energética a escala humana o mayor. La descripción termodinámica del sistema de interés se realiza en términos matemáticos empleando variables microscópicas como la masa molecular, o macroscópicas como la presión, volumen o temperatura (Engel & Reid, 2007).

Un sistema termodinámico está constituido por todos los materiales implicados en el proceso de estudio, el resto del universo es llamado medio ambiente. El sistema puede ser abierto cuando intercambia materia con el medio, de lo contrario es un sistema cerrado; ambos sistemas pueden intercambiar energía con el medio ambiente, aquellos que no lo hacen se denominan sistemas aislados. La interface entre el sistema y el medio que lo rodea se denomina límite, el cual determina la transferencia de energía y masa entre el sistema y el medio ambiente (Engel & Reid, 2007).

5.5 Marco Normativo

En este apartado se evidencia la normatividad colombiana aplicable a la gestión de residuos peligrosos, a partir de la cual se formula la gestión ambiental integral de PCB's, resaltando la prevención, minimización, manejo o evaluación del riesgo. El resumen de dicha revisión se muestra en la *Tabla 3*.

Tabla 3. Marco normativo colombiano para contextualización de la gestión ambiental de PCB's

Tipo	Aspecto	Descripción	Aplicabilidad
Leyes (Congreso de Colombia)	Medidas Sanitarias	Ley 9 de 1979	Art. 3. Definición de obligaciones para quienes produzcan basuras con características especiales. Los productores serán responsables de la recolección, transporte y disposición final.
	Principios Generales Ambientales	Ley 99 de 1993	Art. 1. Principios Generales Ambientales.
	Aprobación del Convenio de Basilea	Ley 253 de 1996	Anexo 1. Categorías de desechos que se deben controlar, entre ellos los PCB's.
	Aprobación del Convenio de Estocolmo	Ley 994 de 2005	Anexo E. Requisitos para la información del perfil de riesgo de producto químico, entre los cuales se incluye la evaluación de riesgo nacional e internacional.
	Sentencia de Constitucionalidad Convenio de Estocolmo	Ley 1196 de 2008	Por medio de la cual se aprueba el Convenio de Estocolmo sobre contaminantes orgánicos persistentes hecho en Estocolmo el 22 de mayo de 2001.
Decreto (presidente de Colombia)	Manejo de Residuos Peligrosos en el Marco de la Gestión Integral	Decreto 4741 de 2005 (Compilado en el Decreto Único Reglamentario 1076 de 2015)	Art. 3. Definición de la gestión integral, la cual incluye la evaluación del riesgo como componente. Anexo III. Característica de peligrosidad de los residuos o desechos peligrosos, incluyendo el término de riesgo ambiental.
Resolución (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible)	Requisitos para la gestión ambiental integral de equipos y desechos contaminados con PCB's	Resolución 222 de 2011	Art. 3. Definición de la gestión ambiental integral de PCB's enmarcado en la minimización del riesgo. Art 33. Prioridades en la identificación y eliminación de uso de PCB's como medida de reducción del riesgo.
	Modificación de la Resolución 222 de 2011	Resolución 1741 de 2016	Art. 9. Inclusión de estrategias dirigidas a la población potencialmente expuesta, con el fin de informarla sobre el riesgo asociado a los equipos y desechos contaminados con PCB's.
Política	Gestión Integral de Residuos Peligrosos	Política Ambiental para la Gestión Integral de Residuos Peligrosos	Incluye la base política para la gestión integral de los RESPEL, objetivos, estrategias y acciones específicas, estrategias generales y plan de acción

Fuente: Autor, 2018.

A partir de esta revisión se concluye que la normatividad aborda conceptualmente las sustancias peligrosas, incluyendo los compuestos orgánicos persistentes COP's. Hablando específicamente de PCB's, el marco legal establece las obligaciones de los importadores, fabricantes y generadores de estas sustancias, estableciendo plazos para la gestión ambiental integral de los PCB's y los métodos de análisis químico en aceite dieléctrico (Torres, 2018).

Con relación a los métodos de análisis, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) es una institución pública que ha apoyado el desarrollo técnico de la gestión de PCB's en Colombia y además trabaja constantemente en la consolidación del inventario nacional de PCB's (Pinzón, 2018).

Gracias al proyecto nacional “Desarrollo de la capacidad para la gestión y eliminación ambientalmente adecuada de los PCB” el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible no sólo expidió las Resolución 222 de 2011 y Resolución 1741 de 2016, sino que además publicó una serie de documentos denominados “Manual para la Gestión Ambiental Integral de Bifenilos Policlorados PCB” (MADS, 2015).

Este manual comprende seis tomos: I. Generalidades y conceptos básicos sobre Bifenilos Policlorados – PCB, II. Consideraciones para la implementación del inventario nacional de PCB, III. Muestreo, toma de muestras, análisis e identificación de equipos y desechos contemplados en la normativa ambiental de PCB, IV. Marcado de equipos eléctricos que consisten, contienen o pueden contener PCB y desechos contaminados con PCB, V. Mantenimientos de equipos con aceites dieléctricos y VI. Manejo ambientalmente racional de equipos y desechos con PCB (MADS, 2015).

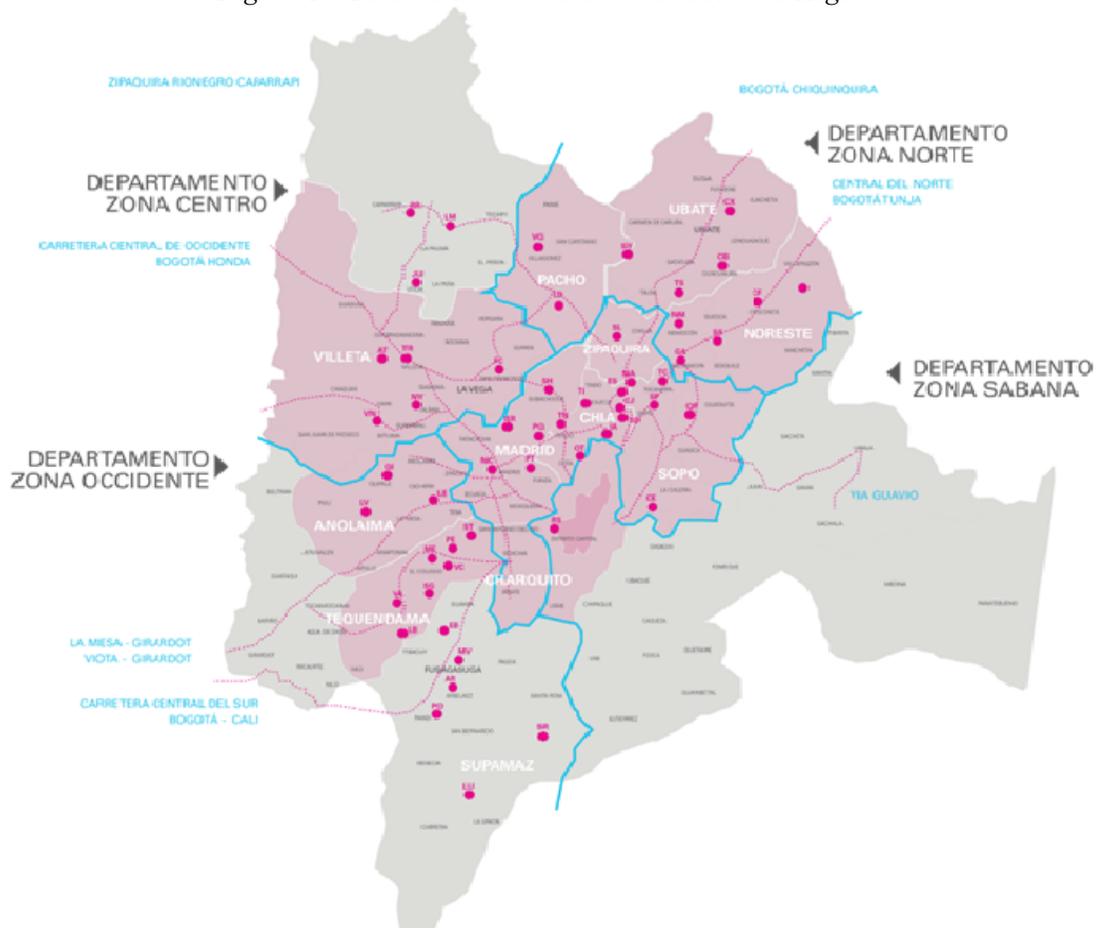
Es importante destacar que la elaboración de este manual comprende un marco de acción para la gestión ambiental de este contaminante, sin embargo, en estos documentos no se define, normaliza o se establecen lineamientos para la evaluación del riesgo ambiental de PCB's en Colombia, lo que genera una limitante para el sector productivo al momento de dar cumplimiento con la obligación de comunicar el riesgo de PCB's a la población.

Este proyecto consolida una primera metodología semicuantitativa de evaluación de riesgo de exposición por inhalación de PCB's aplicada al sector eléctrico a nivel nacional y aportaría como base teórica y práctica para el direccionamiento de diferentes aproximaciones sobre la exposición y el transporte de este contaminante, producto del desarrollo de actividades productivas.

5.6 Marco Geográfico y Socioeconómico

Codensa S.A. E.S.P es una compañía colombiana, dedicada a la distribución y comercialización de energía eléctrica. Fue creada en 1997 como resultado del proceso de capitalización de la Empresa de Energía de Bogotá (Codensa, 2015). Su área de influencia comprende 108 municipios de Cundinamarca y cubre el 100% de la capital del país, además de otros municipios en los departamentos de Boyacá y Tolima, alcanzando una participación en el mercado del país superior al 24% (Codensa, 2015).

Figura 14. Presencia de Codensa en el Contexto Regional.



Fuente: Tomado y modificado de (Codensa, 2015)

Tabla 4. Abreviaciones figura 5

Abreviación	Significado	Abreviación	Significado	Abreviación	Significado
AR	ARBELAEZ	LV	LA VIRGEN	SL	SALINAS
AT	ALTO DEL TRIGO	ME	MESITAS	SP	SOPO
CB	CUCUNUBA	MV	MOVIL FUSA	SR	SANTA ROSA
CE	PATIOS	NA	NELSON ALONSO	SS	SUESCA
CF	CHOCONTA	NC	CORZO NUEVA	ST	SANTANDERCITO
CJ	CAJICA	NM	NEMOCON	SY	SAN CAYETANO
CX	CAPELLANIA	NY	NAMAY	TC	TOCANCIPA
CY	CACIQUE	OT	COTA	TI	TABIO
EB	EL BOSQUE	PE	EL PEÑON	TN	SABANILLA
ER	EL ROSAL	PO	PORTONES	TR	TERRAZAS
FC	SAN FRANCISCO	PT	LA PUNTA	TS	TAUSA
GA	GACHANCIPA	QI	QUIPILE	VA	VIOTA
IA	CHIA	QP	QUINTA PEREZ	VC	LA PITALA
JU	JURATENA	RR	CAPARRAPI	VG	VILLAGOMEZ
LB	LIBRERÍA	RS	RADIO SANTA FE	VN	VIANI
LD	LA DORADA	SD	SIND AMANOY	VP	VILLAPINZON
LE	LA ESPERANZA	SG	SAN GABRIEL	LU	LA UNION
LM	LA PALMA	SH	SUBACHOQUE		

Fuente: Tomado y modificado de (Codensa, 2015)

Codensa S.A. ESP cuenta con más de 120 subestaciones que le permiten operar de manera sólida y confiable para satisfacer la demanda de 3.3 millones de clientes, convirtiendo a la filial del grupo italiano Enel, en la empresa número uno del Colombia en atención a clientes, gracias a los más de 45.000 kilómetros de redes de media y baja tensión, extendidas a lo largo de Bogotá y la zona rural de Cundinamarca (Codensa, 2015).

El diseño metodológico para la evaluación del riesgo ambiental asociado a PCB's en transformadores eléctricos instalados en las redes de distribución de energía de Codensa S.A. E.S.P, es acotado al perímetro urbano de Bogotá, debido a que la información ambiental relacionada con las variables meteorológicas y de infraestructura está disponible, a diferencia de las zonas rurales del área metropolitana. Por otra parte, la densidad poblacional de esta zona de influencia es superior, por lo que el perímetro urbano de Bogotá representa un sistema dinámico sobre el cual vale la pena realizar la primera estimación de exposición a PCB's, dada la interacción poblacional con las redes de distribución de la compañía

5.7 Marco Institucional

Codensa S.A. E.S.P como compañía colombiana que pertenece al Grupo Enel, multinacional que opera 37 países de 5 continentes, gestiona la generación de energía de unos 84 GW de capacidad instalada neta y distribuye electricidad y gas a través de una red que abarca alrededor de 1,9 millones de kilómetros; Enel cuenta con casi 64 millones de usuarios finales en todo el mundo (Codensa, 2017). En América Latina el Grupo está presente en Chile, Brasil, Colombia, Argentina y Perú (Codensa, 2015).

El diseño metodológico para la evaluación del riesgo ambiental asociado PCB's en transformadores eléctricos instalados en las redes de distribución de energía de Codensa S.A. E.S.P, es un proyecto impulsado desde la División de Salud, Seguridad y Medio Ambiente Colombia (HSE), esta división es responsable de la gestión del riesgo de aspectos ambientales significativos de la operación de la infraestructura y redes energéticas de las unidades operativas, como es en este caso puntual, la generación de residuos contaminados con PCB's (HSEQ, 2017).

HSE es una división especializada en la gestión ambiental, que hace parte de la subgerencia Salud, Seguridad, Medio Ambiente y Calidad Colombia, homóloga en otros 8 países que conforman la Gerencia de Infraestructura y Redes Global del Grupo Enel, como se muestra en el *Anexo I*.

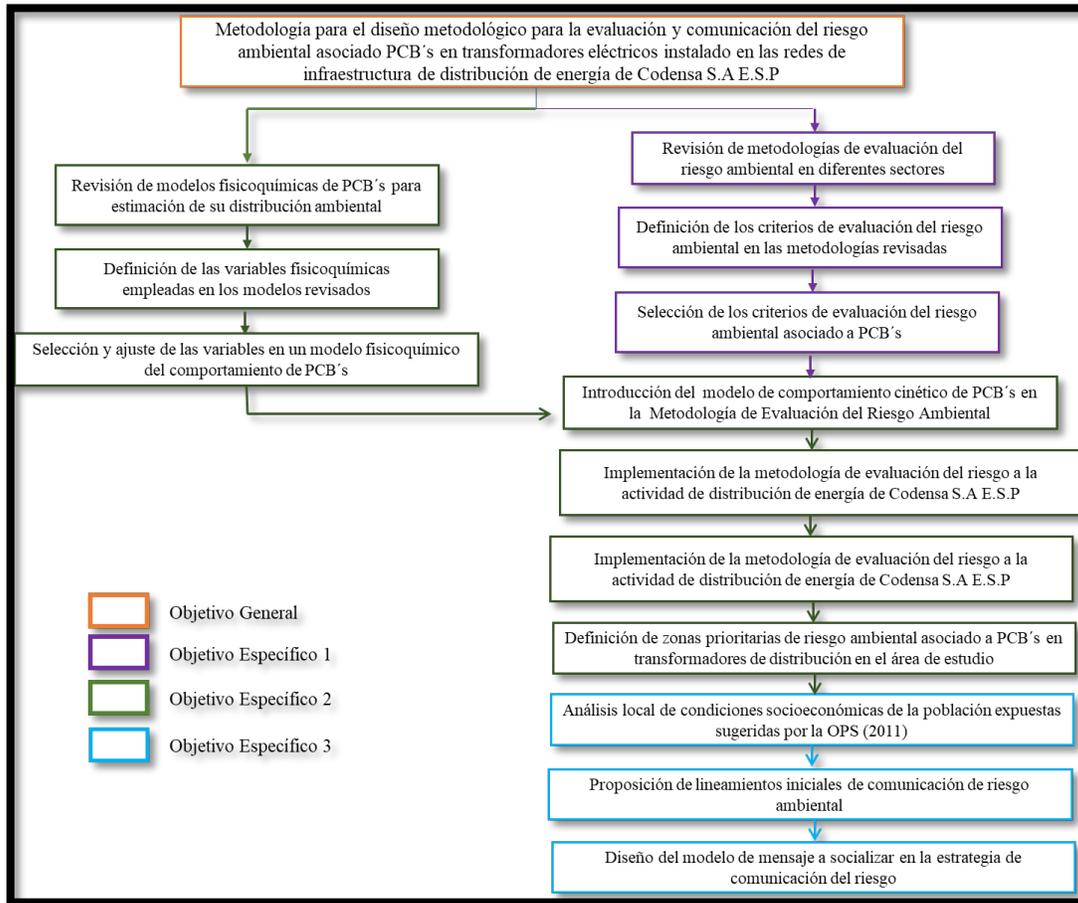
6. Metodología

Para la consolidación del diseño metodológico de evaluación y comunicación del riesgo ambiental asociado a PCB's en transformadores eléctricos instalado en las redes de distribución de energía de Codensa S.A E.S.P, fue necesario realizar una secuencia lógica para dar cumplimiento al objetivo general planteado. En primer lugar, se analizaron diferentes metodologías de evaluación de riesgo ambiental (ERA), para seleccionar criterios de evaluación relacionados a la exposición a PCB's, y de manera homóloga se analizaron modelos fisicoquímicos del comportamiento del contaminante para el planteamiento de un modelo semiempírico para medir el alcance del riesgo en función de las condiciones fisicoquímicos del sistema evaluado.

Así, el modelo fisicoquímico producto del ajuste de ciertas variables seleccionadas, fue correlacionado con los criterios de evaluación en una metodología de evaluación del riesgo, en la medida que el modelo se introdujo como una herramienta para la evaluación de un criterio de evaluación (cuantificación del riesgo), y a partir de esta determinación se consolidó el método para la definición de zonas de riesgo prioritarias de exposición a PCB's en transformadores eléctricos instalado en las redes de distribución de energía de Codensa S.A E.S.P, que fundamentan la proposición de lineamientos de comunicación del riesgo.

En pocas palabras, a partir de la aplicación de la metodología de evaluación de riesgo ambiental diseñada, y el análisis de sus resultados fue posible representar espacialmente el riesgo en cuestión, mediante el software ArcGis Versión 10.4, y dar inicio a la propuesta de lineamientos iniciales de comunicación del riesgo ambiental, basados también en las consideraciones de planeación para la comunicación del riesgo establecidas en la Guía para la Elaboración de la Estrategia de Comunicación de Riesgo, publicada por la OPS (2011).

Figura 15. Metodología para la Consolidación del Objetivo de Investigación



.Fuente: Autor, 2018

6.1 Procedimiento para el cumplimiento del Objetivo 1

En este sentido, para el logro del primer objetivo específico, asociado a la correlación de variables de evaluación del riesgo ambiental de los PCB's, con las variables fisicoquímicas de este contaminante, se realizaron los siguientes procedimientos descritos en la siguiente tabla 5.

Tabla 5. Procedimientos para la correlación de variables de evaluación del riesgo ambiental de los PCB's, con variables fisicoquímicas de este contaminante.

Procedimiento	Actividades	Entregable
Selección de criterios ambientales para la evaluación del riesgo ambiental de PCB's	Revisar metodologías de evaluación de riesgo ambiental de contaminantes, incluyendo PCB's	Matriz de variables de evaluación de riesgo ambiental de PCB's
	Analizar las metodologías de evaluación de riesgo ambiental para la abstracción de criterios de evaluación	
	Selección de criterios para el diseño metodológico de la evaluación del riesgo ambiental asociado a PCB's en transformadores instalados en redes distribución de energía de Codensa S.A.E.S.P	Matriz de consolidación del método de evaluación del riesgo ambiental asociado a PCB's

Fuente: Autor, 2018

6.2 Procedimiento para el cumplimiento del Objetivo 2

Para el logro del segundo objetivo específico, entendido como la evaluación de la metodología preliminar del comportamiento de los PCB's a partir de la información registrada en el inventario de equipos, de Codensa S.A. E.S.P en Bogotá, Colombia, se realizaron los procedimientos, consignados en la Tabla 6. La formulación del modelo preliminar del comportamiento de los PCB's, se desarrolló de forma paralela a los procedimientos necesarios para el logro del objetivo específico número uno, ya que la correlación de las variables fisicoquímicas y ambientales implicó en cierta medida la introducción del modelo de comportamiento cinético del contaminante en el método de evaluación de riesgo ambiental.

La formulación del modelo preliminar del comportamiento de los PCB's, se desarrolló de forma paralela a los procedimientos necesarios para el logro del objetivo específico número uno, ya que la correlación de las variables fisicoquímicas y ambientales implicó en cierta medida la introducción del modelo de comportamiento cinético del contaminante en el método de evaluación de riesgo ambiental

Tabla 6. Procedimientos para la evaluación de la metodología preliminar del comportamiento de los PCB's.

Procedimiento	Actividades	Entregable
Aplicar parcialmente la metodología de evaluación del riesgo ambiental asociado a PCB's en transformadores eléctricos instalados en las redes de distribución de energía de Codensa S.A. E.S.P en Bogotá, Colombia	Implementación la metodología de evaluación del riesgo con los criterios de evaluación seleccionados hasta la sección de cuantificación del riesgo, donde se abordará el planteamiento del modelo fisicoquímico de PCB's	Evaluación inicial del riesgo asociado a PCB's en el área de estudio seleccionada
		Mapa de distribución espacial de la muestra de transformadores eléctricos a evaluar, empleando el software ArcGis versión 10.4
Plantear el modelo fisicoquímico de distribución de PCB's para la evaluación del riesgo ambiental	Revisar estudios fisicoquímicos de distribución de PCB's	Modelo fisicoquímico semiempírico del comportamiento fisicoquímico del PCB presente en aceite dieléctrico
	Abstraer las variables fisicoquímicas para la evaluación de la distribución de PCB's	
	Ajustar un modelo fisicoquímico de PCB's con base a las variables seleccionadas y las ecuaciones preliminares planteadas en el software SigmaPlot V.14.0	
Terminación de la evaluación del riesgo ambiental de PCB's con base al modelo de comportamiento fisicoquímico planteado	Determinar la distribución de PCB's en el área de estudio mediante el modelo de comportamiento fisicoquímico diseñado y georreferenciar la información, empleando el software ArcGis versión 10.4,	Mapa de distribución del riesgo ambiental asociado a PCB's en el área de estudio, empleando el software ArcGis versión 10.4
	Determinación de la influencia del riesgo ambiental asociado a PCB's en las zonas de riesgo definidas por la Resolución 222 de 2011	Análisis estadístico del impacto del riesgo en las zonas de riesgo, empleando el software ArcGis versión 10.4
	Definir zonas de riesgo prioritarias para la proposición de lineamientos de comunicación del riesgo ambiental	Mapa de distribución de zonas de riesgo ambiental prioritarias en el área de estudio, empleando el software ArcGis versión 10.4

Fuente: Autor, 2018

6.3 Procedimiento para el cumplimiento del objetivo 3

Finalmente, se desarrollaron los procedimientos para para la propuesta de lineamientos iniciales de comunicación del riesgo ambiental que fortalezcan la gestión ambiental integral de equipos y desechos que consisten, contienen o están contaminados con Bifenilos Policlorados (PCB) entendido como el último objetivo específico. Estos lineamientos constituyeron un direccionamiento de la estrategia de comunicación del riesgo ambiental asociado a PCB's en transformadores instalados en las redes de distribución, para lo cual en primer lugar se analizó los resultados de la aplicación de la metodología de evaluación de riesgo ambiental y la distribución del riesgo evidenciado en el mapa de riesgo ambiental.

Estos dos entregables, fueron el punto de partida para la comprensión del panorama de riesgo. La definición de zona prioritaria de comunicación se asoció directamente a la zona que presentó mayor riesgo ambiental asociado a PCB's.

Tabla 7. Procedimientos para la propuesta de lineamientos iniciales de comunicación del riesgo ambiental

Procedimiento	Actividades	Entregable
Postulación inicial de los lineamientos de comunicación del riesgo, en conformidad con las consideraciones de la etapa de planeación para la futura estrategia de comunicación del riesgo ambiental (OPS, 2011)	Propuesta de conformación de equipo de comunicación del riesgo	Modelo de mensaje de comunicación del riesgo ambiental asociado a PCB's en transformadores de distribución en Bogotá
	Análisis del contexto de la zona de riesgo prioritaria	
	Identificación de públicos destinatarios en la zona de riesgo prioritaria	
	Planificación de la respuesta de la estrategia de comunicación	

Fuente: Autor, 2018

7. Resultados y Discusión

7.1 *Revisión de metodologías de evaluación de riesgo ambiental para la selección de variables de interés en el diseño metodológico*

Como se expuso en el marco de referencia, dos son las metodologías que han definido el marco procedimental para el análisis de riesgo ambiental, una de ellas fue diseñada por la Agencia de Protección Ambiental (EPA) y la otra fue diseñada por la Agencia para las Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades del Departamento de Salud Pública (ATSDR).

La primera metodología estima el riesgo en salud basándose en datos ambientales del sitio y la segunda metodología evalúa el riesgo en salud, con fundamento en los datos ambientales y en los antecedentes de salud registrados en el área de influencia del sitio (Díaz, 2000).

Para la selección de variables de interés y el método para la evaluación del riesgo ambiental asociado a PCB's, se revisaron tres metodologías de evaluación del riesgo ambiental inspiradas en los principios tradicionales de la EPA y la ASTDR, adaptadas a diferentes contextos interesantes para el diseño (sector público, sector minero, sector industrial). Para cada una de estas metodologías se identificó la institución o investigadores desarrolladores de la metodología, su objetivo, la descripción del método de evaluación y las variables ambientales a evaluar.

7.1.1 *Manual de Evaluación y Gestión del Riesgo Asociado a los COP del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia (Dirección Desarrollo Sectorial Sostenible, 2007).*

7.1.1.1 *Institución o investigadores de la metodología de evaluación del riesgo (Dirección Desarrollo Sectorial Sostenible, 2007).*

El Manual de Evaluación y Gestión del Riesgo Asociado a los COP fue desarrollada por la Dirección de Desarrollo Sectorial Sostenible del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT), hoy denominado Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), publicado en el año 2017.

7.1.1.2 *Objetivo de la metodología de evaluación del riesgo (Dirección Desarrollo Sectorial Sostenible, 2007).*

Este manual es una herramienta generada a partir del Taller Nacional sobre Evaluación y Gestión del Riesgo asociado a los Contaminantes Orgánicos Persistentes (COP), que tuvo lugar del 21 al 24 de noviembre de 2006. En este manual se abordan los temas básicos conceptuales del riesgo, los lineamientos para la gestión y evaluación de los mismos, y se presenta una serie de casos demostrativos para orientar el trabajo de las autoridades nacionales competentes.

7.1.1.3 *Descripción del método de evaluación del riesgo (Dirección Desarrollo Sectorial Sostenible, 2007).*

Este manual establece tres pasos para la evaluación del riesgo asociado a los compuestos orgánicos persistentes, descritos a continuación.

Desarrollo de un modelo conceptual: se representa visualmente las relaciones entre los contaminantes y sus receptores, incluyendo vías de eliminación, su comportamiento en los compartimientos ambientales y las rutas por las cuales llegan a los organismos vivos, priorizando aquellos aspectos de evaluación que se consideran más relevantes.

Análisis específico de los niveles de exposición y de efectos: Se analiza y cuantifica cómo entra la sustancia en contacto con el receptor, para este fin se realiza la identificación de peligros que se deben considerar en la evaluación, es decir, el tipo de efectos adversos que puede producir la sustancia. Para la evaluación a riesgos a la salud se consideran los modos de acción relevantes como la carcinogenicidad y toxicidad sobre determinados sistemas u órganos, así como las vías de exposición (oral, inhalación, contacto dérmico) y las escalas temporales.

En las evaluaciones ambientales, la identificación de los peligros se orienta hacia el tipo de efectos y/o receptores que se espera puedan verse afectados. Algunos de estos efectos son abióticos, pero también se estudian los efectos sobre las poblaciones o comunidades (grupos taxonómicos) que se consideran los receptores ecológicos sensibles. Se suelen distinguir tres procesos consecutivos: el proceso de liberación o emisión al medio; el comportamiento y distribución de la sustancia en el medio ambiente tras su liberación; y las rutas por las cuales se produce la exposición. Un aspecto fundamental en esta estimación consiste en llegar a cuantificar los niveles de exposición de todos los receptores relevantes, y poder expresarlos en términos y unidades compatibles con los empleados en la evaluación de efectos.

Con relación a los PCB's, la metodología sustenta que el control y la cuantificación de las emisiones en el caso de usos difusos, incluidos los usos no industriales, así como los que se producen tras la incorporación de la sustancia a artículos de consumo y durante su eliminación es mucho más compleja, como es el caso de los PCB. La cuantificación de la exposición puede realizarse en forma de dosis. Cuando esto no es posible, la exposición se cuantifica mediante la estimación de las concentraciones del contaminante en el medio. En el caso específico de los COP, la ruta de exposición más relevante es la oral a través del alimento y se han desarrollado modelos que permiten estimar los niveles reales de exposición para muchas especies a partir de las concentraciones en el alimento.

Caracterización de riesgos: La caracterización del riesgo consiste en la comparación entre los niveles de exposición y de efectos estimados para el contaminante. El objetivo es identificar la probabilidad de que se produzcan efectos adversos y la magnitud de estos. Resulta habitual realizar una caracterización preliminar o de bajo nivel para determinar si se puede descartar o no la existencia del riesgo. De no descartarse, se debe obtener más información y complementar la evaluación hasta alcanzar una conclusión definitiva.

La estimación del nivel de riesgo se realiza mediante la comparación de las concentraciones ambientales o dosis de exposición de los individuos, con las concentraciones o dosis que originan efectos adversos. La incertidumbre asociada a la estimación deberá ser considerada a la hora de tomar las decisiones.

Cuando no es posible determinar la dosis, se cuantifica el riesgo mediante la utilización de cocientes de riesgo. En estos casos se comparan directamente los niveles de exposición esperados, con los niveles de efectos considerados suficientemente bajos como para proteger la salud o el medio ambiente (denominados "criterios de calidad", "objetivos de calidad", "umbrales (eco) toxicológicos", etc.). Si

los niveles de exposición son superiores a los de efecto, es decir, el cociente es mayor que 1, se debe considerar un riesgo potencial; mientras que, si son menores, se asume un riesgo suficientemente bajo como para ser aceptable.

7.1.1.4 Descripción de variables de evaluación de la metodología (Dirección Desarrollo Sectorial Sostenible, 2007).

Este manual presenta los diferentes enfoques que puede tomar una evaluación del riesgo asociado a compuestos orgánicos persistentes. La definición del enfoque se define en función de la(s) variable(s) que se seleccionen en el diseño de la metodología de evaluación en cada uno de los procesos descritos en la *Tabla 8*, esto con el objetivo de diseñar una metodología que se ajuste al problema identificado.

Tabla 8. Registro de variables de evaluación del riesgo definidas en el Manual de Evaluación y Gestión del Riesgo Asociado a los COP

Proceso	Variable	Parámetros por evaluar
Definición del problema	Objeto de evaluación	•Salud •Ambiente •Ambas
	Estructura de la Evaluación	•Por niveles •Determinística •Eficacia de emplazamiento
Análisis de Nivel de Exposición	Vías de exposición	•Cutánea •Inhalación •Oral •Alimento
	Transferencia de compartimiento ambiental	•Agua •Suelo •Aire
	Escala temporal	•Exposición única •Exposición repetida durante periodos cortos •Exposición repetida a largo plazo
Análisis de Efectos	Efectos a la salud	•Toxicidad aguda •Toxicidad sobre órganos o sistemas •Corrosión/irritación cutánea •Irritación ocular •Sensibilidad respiratoria o cutánea •Mutagenicidad en células germinales •Carcinogenicidad •Toxicidad para la reproducción •Toxicidad sistémica específica de órganos diana
	Efectos bióticos al ecosistema	•Toxicidad por compartimiento (toxicidad organismos acuáticos, de sedimento, del suelo, aéreos) •Toxicidad por grupos taxonómicos (vertebrados, invertebrados, algas, plantas, microorganismos)
	Efectos abióticos al ecosistema	•Capa de ozono •Acidificación •Efecto Invernadero •Afectación a compartimientos (suelo, agua, aire)
Cuantificación de la exposición	Dosis	•Dosis interna •Dosis externa
	Concentración del contaminante en el medio	•Concentración en agua •Concentración en aire •Concentración en suelo •Concentración en alimento
Caracterización del riesgo	Cocientes de riesgo	•Concentración de exposición estimada/ concentración de efectos • Dosis de exposición/ dosis respuesta

Fuente: Tomado y modificado de (Dirección Desarrollo Sectorial Sostenible, 2007).

7.1.2 Procedimiento de Manejo de PCB durante el Mantenimiento de Equipos (Dirección General de Calidad Ambiental. Ministerio del Ambiente de Perú, 2016).

7.1.2.1 Institución o investigadores de la metodología de evaluación del riesgo (Dirección General de Calidad Ambiental. Ministerio del Ambiente de Perú, 2016).

La Dirección General de Calidad Ambiental del Ministerio de Ambiente de Perú publicó en el año 2016 un documento denominado Procedimiento de Manejo de PCB durante el Mantenimiento de Equipos, en el cual se establece una metodología de evaluación de riesgo inspirada en el Documento Técnico N° 398 del Banco Mundial, elaborado por Ayres, W., Anderson, K., & Hanrahan, D., (1998).

7.1.2.2 *Objetivo de la metodología de evaluación del riesgo* (Dirección General de Calidad Ambiental. Ministerio del Ambiente de Perú, 2016).

Este procedimiento tiene por objetivo identificar, predecir y evaluar los riesgos ambientales y de seguridad que potencialmente impactan sobre los medios físico, biológico, socioeconómico y cultural, asociados a las actividades de operación, mantenimiento y reparación de equipos con PCB en las actividades mineras del país. La evaluación califica los riesgos negativos o adversos y sus correspondientes grados de importancia dependiendo de ciertos factores.

7.1.2.3 *Descripción del método de evaluación del riesgo* (Dirección General de Calidad Ambiental. Ministerio del Ambiente de Perú, 2016).

Para la aplicación práctica, el modelo de evaluación utilizado consiste en una serie de hojas de cálculo que permiten la expresión numérica de cada riesgo en términos de su ocurrencia, severidad, prevención y control. Esto permite asignarle un puntaje a cada posible riesgo asociado a una actividad, para posteriormente clasificarlo de acuerdo con su prioridad relativa y grado de importancia. Para tal fin, se siguen los siguientes pasos.

Establecimiento de actividades: se establecen las actividades principales durante la operación, mantenimiento y reparación de transformadores que fundamentan el riesgo.

Elaboración de matriz de riesgos: se elabora la matriz de identificación de riesgos potenciales que se podrían generar sobre cada uno de los factores ambientales y socioeconómicos, como consecuencia del desarrollo de las actividades productivas.

Análisis cualitativo: para cada impacto identificado se realiza un análisis cualitativo en función de la relación causa/efecto (directo o indirecto), duración (permanente o temporal), área de impacto (extenso o localizado), predictibilidad, mitigación (mitigable o no mitigable) y control.

Evaluación de riesgo: con el sustento del análisis cualitativo para todos los riesgos identificados, se realiza la evaluación correspondiente, elaborando las matrices de evaluación, y asignando puntajes en función de la ocurrencia, severidad y control de cada impacto. Esto permite obtener un puntaje total y asignar un nivel de importancia o significancia a cada impacto.

7.1.2.4 Descripción de variables de evaluación de la metodología (Dirección General de Calidad Ambiental. Ministerio del Ambiente de Perú, 2016).

A grandes rasgos, este procedimiento considera un análisis cualitativo previo al análisis cuantitativo del riesgo, este último da lugar a la categorización del riesgo en función del puntaje total obtenido de la evaluación. Por lo tanto, las variables de esta metodología pueden ser cualitativas, presentadas en la *Tabla 9*, o cuantitativas, presentadas en la *Tabla 10*. El cálculo del puntaje total del riesgo y su categorización se muestran en la *Tabla 9*.

Tabla 9. Registro de variables de evaluación cualitativa del riesgo definidas en el Procedimiento de Manejo de PCB durante el Mantenimiento de Equipos

Proceso	Criterio	Parámetros por evaluar
Identificación de Actividades antropológicas	Operación de equipos de transformación	•En subestación aérea •En subestación subterránea •Al aire libre •En casetas
	Mantenimiento mayor o reparación	-
Identificación de Riesgo en Medio Físico	Suelo	•Uso potencial •Calidad de suelo
	Aire	•Calidad del aire • Ruidos • Radiaciones electromagnéticas
	Geología	•Procesos geodinámicos• Erosión
	Agua	•Calidad de agua • Áreas hidromórficas
Identificación de Riesgo en Medio Biológico	Flora	•Cobertura herbácea • Cobertura arbustiva • Cobertura arbórea • Especies protegidas
	Fauna	•Fauna acuática• Reptiles/Anfibios • Aves • Mamíferos • Especies en peligro
Identificación de Riesgo en Medio Socioeconómico	Sociales	Salud • Seguridad • Modo de vida • Conflictos • Educación • Transporte • Saneamiento
	Económicas	• Abastecimiento de energía • Empleo • Valor de la Tierra • Agricultura • Ganadería • Contaminación cruzada
Evaluación cualitativa del riesgo	Efecto	Siempre es adverso negativo
	Relación causa-efecto	Sólo se tiene en cuenta la directa
	Duración	• Permanente • Temporal
	Área de impacto	• Extendida • Localizada
	Condición	• Reversible • Irreversible
	Mitigación	• Mitigable • No mitigable

Fuente: Tomado y modificado de (Dirección General de Calidad Ambiental. Ministerio del Ambiente de Perú, 2016)

Tabla 10. Registro de variables en la evaluación cuantitativa del riesgo definidas en el Procedimiento de Manejo de PCB durante el Mantenimiento de Equipos

A. Probabilidad de Ocurrencia del riesgo	Valor posible	B. Duración del Impacto	Valor posible
No ocurrir	0	Instantáneo	0
Baja probabilidad de ocurrencia	2	Corto plazo (<1 año)	2
Mediana probabilidad de ocurrencia	5	Mediano plazo (<5 años)	5
Alta probabilidad de ocurrencia	8	Largo plazo (8 años)	8
Certeza de ocurrencia	10	Permanente/irreversible	10
C. Extensión del Riesgo	Valor posible	D. Población impactada	
10m de radio	0	0 habitantes	0
100m de radio	1	<50 habitantes	1
1 km de radio	2	<200 habitantes	2
En un sector de la ciudad	3	<50.000 habitantes	3
En toda la ciudad	5	<350.000 habitantes	5
Regional	8	<1.000.000 habitantes	8
Nacional/Internacional	10	>1.000.000 habitantes	10
E. Impacto a la salud humana	Valor posible	F. Impacto al ecosistema	Valor posible
Mejoramiento sustancial/Potencialmente fatal	10/-10	Mejoramiento sustancial/Deterioro mayor ecosistema sensible	10/-10
Mejoramiento mayor/Deterioro mayor	7/-7	Mejoramiento mayor/Deterioro mayor	7/-7
Mejoramiento menor/Deterioro menor	2/-2	Mejoramiento mínimo/Deterioro menor	2/-2
Sin impacto	0	Sin impacto	0
G. Impacto sociocultural	Valor posible	H. Impacto económico	Valor posible
Mejoramiento sustancial/Pérdida total de recursos	10/-10	Mejoramiento sustancial/Deterioro catastrófico	10/-10
Mejoramiento mayor/Deterioro mayor de recursos	7/-7	Mejoramiento mayor/Deterioro mayor de recursos	7/-7
Mejoramiento menor/Deterioro menor de recursos	2/-2	Mejoramiento menor/Deterioro menor de recursos	2/-2
Sin impacto	0	Sin impacto	0
I. Medidas de prevención	-ve/+ve impactos	J. Medidas de mitigación	-ve/+ve impactos
Es posible prevención completa	0/0	Es posible mitigación completa	0/0
Es posible prevención extensiva	2/0	Es posible mitigación extensiva	2/0
Es posible prevención parcial	5/0	Es posible mitigación parcial	5/0
Es posible prevención temporal	8/0	Es posible mitigación temporal	8/0

Fuente: (Dirección General de Calidad Ambiental. Ministerio del Ambiente de Perú, 2016). (“ve” representa valor del efecto)

Tabla 11. Categorización y cálculo del riesgo en la evaluación cuantitativa definidos del Procedimiento de Manejo de PCB durante el Mantenimiento de Equipos

Para el cálculo del Puntaje Total se aplica: $PT=(A+B+C+D) * (E+F+G+H) * (I+J+K+L)/1000$		
Categoría de Importancia	Resultado del Riesgo	
	Negativo	Positivo
Extrema	$\leq -15,0$	$\geq +15,0$
Alta	$\leq -5,0$	$\geq +5,0$
Media	$\leq -1,0 \geq$	$\geq +1,0$
Baja	$>-1,0$	$<+1,0$

Fuente: Tomado y modificado de (Dirección General de Calidad Ambiental. Ministerio del Ambiente de Perú, 2016)

7.1.3 Metodología de Análisis de Riesgos Ambientales (Norma UNE 150008:2008) de la Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR, 2008).

7.1.3.1 Institución o investigadores de la metodología de evaluación del riesgo (AENOR, 2008).

Esta metodología hace parte del conjunto de documentos normativos UNE (Una Norma Española), emitida bajo el número UNE 150008, la cual estandariza el análisis de riesgos ambientales. La metodología fue diseñada por el comité técnico de normalización (CTN) de la Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR) en el año 2008.

7.1.3.2 Objetivo de la metodología de evaluación del riesgo (AENOR, 2008).

El objetivo de esta norma es describir el método para analizar y evaluar el riesgo ambiental asociado a las actividades del sector productivo, favoreciendo la toma de decisiones en el ámbito empresarial, y administrativo. La metodología es aplicable a emplazamientos, actividades y organizaciones de cualquier naturaleza y sector productivo, abordando tanto el sistema de producción general, como las unidades del proceso.

7.1.3.3 Descripción del método de evaluación del riesgo (AENOR, 2008).

Antes de abordar la evaluación del riesgo, esta metodología propone tener en cuenta una serie de consideraciones previas. En esta etapa se resalta el desarrollo de un análisis preliminar, teniendo en cuenta el alcance del estudio.

De esta forma, se definen los posibles afectados, las líneas del proceso objeto de estudio, la fase de la actividad objeto de análisis, el ámbito geográfico (según la complejidad del proceso), los grupos de interés externos e internos relevantes, las condiciones requeridas en el equipo responsable del estudio y por último, la frecuencia de actualización y revisión con la que se evaluaría el riesgo, teniendo en cuenta los cambios del sistema.

Como método para la evaluación del riesgo se plantean dos etapas de evaluación; la definición de escenarios causales y la definición de escenarios consecuencia. Dando alcance a lo anterior, se sigue la siguiente secuencia de pasos.

Identificación de causas y peligros: se tienen en cuenta tres escenarios; actividades e instalaciones, factor humano y los elementos externos a la instalación.

Identificación de sucesos iniciadores: definido como el hecho físico que puede generar un incidente o accidente, en función de su evolución en espacio tiempo.

Asignación de probabilidad del suceso iniciador: se puede emplear la técnica del árbol de fallos para determinar la ocurrencia.

Postulación de escenarios de accidentes: se define mediante un árbol de sucesos, la secuencia de eventos o alternativas posibles que, con una probabilidad conocida, dan lugar a los escenarios de riesgos. Se realiza en primer lugar un diagnóstico del entorno para identificar, caracterizar y determinar los factores ambientales susceptibles y multiplicadores del riesgo, estos factores se dividen en factores ambientales (medio físico, biótico y humano y socioeconómico) y factores condicionantes del entorno.

Asignación de probabilidad del escenario de accidente: el resultado se expresa en términos cuantitativos o semicuantitativos, teniendo como base datos históricos, información de proveedores o bibliografía especializada. A cada escenario se le asigna una única probabilidad de ocurrencia.

Estimación del riesgo: se estiman las consecuencias asociadas a un escenario de incidentes, empleando metodologías cualitativas o cuantitativas. Teniendo en cuenta que conceptualmente el riesgo se calcula como $Riesgo = Probabilidad / Frecuencia \times Gravedad \text{ de las consecuencias}$, a cada escenario (natural, humano, socioeconómico) se le asignan estos tres valores.

Evaluación del riesgo ambiental: la organización define la tolerabilidad del riesgo teniendo en cuenta los criterios legales, la estrategia de la compañía, tecnologías disponibles, aspectos económicos, y las expectativas de los grupos de interés. Es importante identificar las fuentes de incertidumbre y su contribución a la estimación final del riesgo, mediante análisis de sensibilidad.

7.1.3.4 Descripción de variables de evaluación de la metodología (AENOR, 2008).

La norma UNE 150008:2008, no establece las variables a evaluar en cada etapa del análisis causal y de consecuencias, sin embargo, las variables abstraídas de esta metodología de evaluación de riesgo ambiental se describen en la *Tabla 12*.

Tabla 12. Registro de variables de evaluación de riesgo ambiental abstraídos de la norma UNE 150008:2008

Proceso	Criterio	Parámetro por evaluar
Consideraciones previas	Fase de la actividad	•Diseño •Construcción •Operación
	Grupos de interés	•Internos •Externos
	Frecuencia	•Variable •Periódico
Identificación de causas y peligros en actividades e instalaciones	Almacenamientos	•Materias primas •Combustibles •Productos intermedios •Productos terminados
	Procesos e instalaciones productivas	•Equipos •Trasiegos •Disposición •Medidas de Seguridad •Condiciones del entorno •Condiciones del proceso •Programas de mantenimiento
Identificación de causas y peligros en factor humano	Ámbito organizativo	•Estructura •Sistema de Gestión •Cultura preventiva •Procedimientos •Comunicaciones •Condiciones ambientales del sitio de trabajo •Clima organizacional
	Ámbito individual	•Formación •Entrenamiento •Capacitación •Error humano
Identificación de causas y peligros en elementos externos de la instalación	Naturales	•Físicos •Bióticos
	Infraestructura y suministros	No define
	Socioeconómico	•Vandalismo •Sabotaje
	Instalaciones vecinas	No define
Postulación de escenarios de accidentes según factores ambientales	Medio físico	•Clima •Calidad del Aire •Ruido y vibraciones •Patrimonio •Paisaje
	Medio biótico	•Fauna •Flora •Estructura de ecosistemas •Especies y Espacios protegidos
	Medio humano y socioeconómico	•Salud •Bienestar •Mortalidad •Morbilidad •Estructura territorial •Estructura social •Estructura económica
	Factores condicionantes	•Régimen de caudales •Altura capa freática •permeabilidad del suelo
Asignación de probabilidad del escenario de accidente	Probabilidad de ocurrencia	• Si • No
Estimación del riesgo	Probabilidad	No define
	Frecuencia	No define
	Gravedad	No define

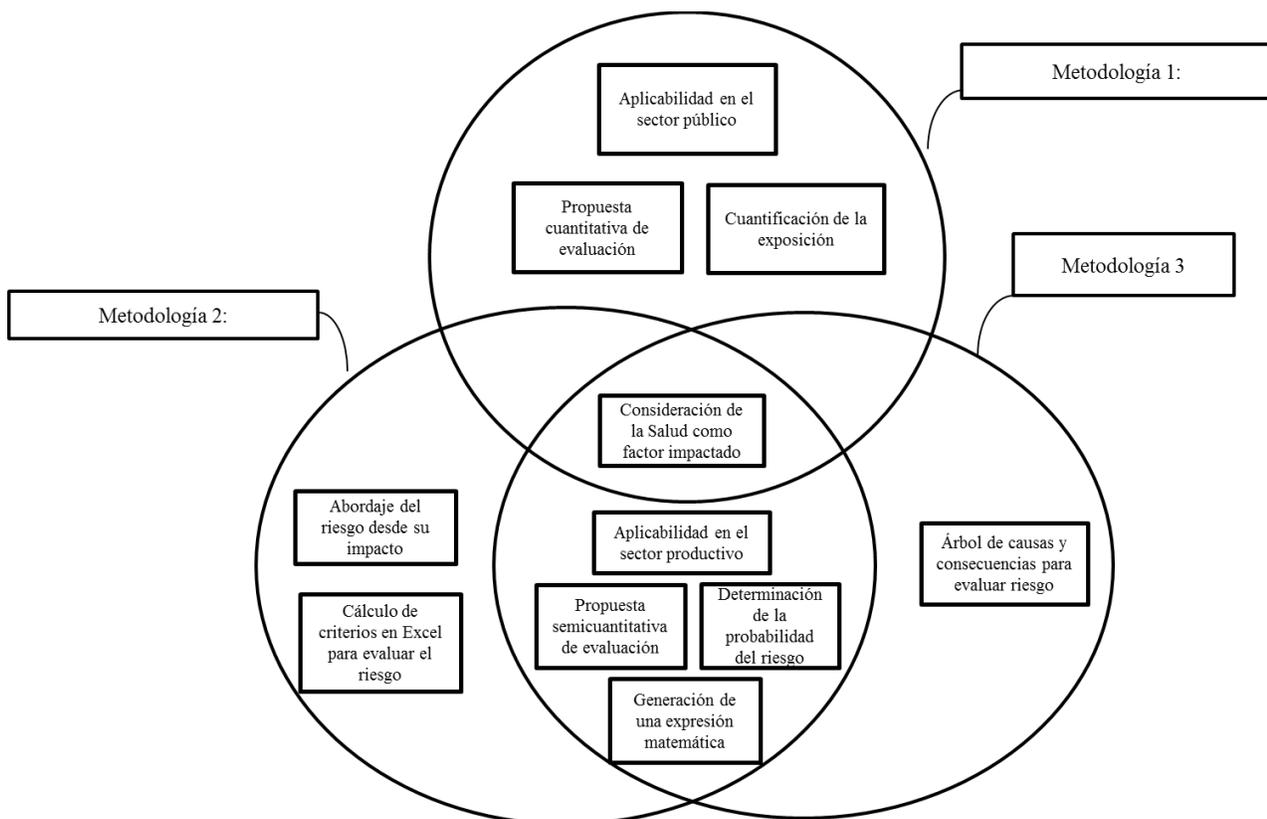
Fuente: Tomado y modificado de (AENOR, 2008)

7.2 Análisis comparativo de las metodologías de evaluación de riesgo ambiental

En primer lugar, se debe tener en cuenta que el riesgo puede ser evaluado de manera cualitativa o cuantitativa. Mediante las metodologías cuantitativas de evaluación de riesgo, los efectos son determinados en unidades de medida como probabilidad de ocurrencia, para lo cual se emplean cálculos matemáticos. Por otra parte, las metodologías cualitativas describen el origen potencial de los peligros, sin determinar propiamente la probabilidad del evento que genera el riesgo y la magnitud de las consecuencias (Melko, Ievins, & Roja, 2012).

En este apartado se presenta el análisis comparativo de las tres metodologías de evaluación del riesgo ambiental, fundamental para la definición del método y las variables de evaluación del diseño metodológico. En primer lugar, se presenta una comparación general de las metodologías en la *Figura 7*.

Figura 16. Análisis comparativo de las similitudes y diferencias de las metodologías de evaluación del riesgo referenciadas,



Fuente: Autor, 2018.

Después de revisar las tres metodologías de evaluación de riesgo ambiental, se puede concluir que la primera metodología, “*Manual de Evaluación y Gestión del Riesgo Asociado a los COP del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia*”, si bien no establece una metodología específica para la evaluación de riesgo ambiental, si sugiere la utilización de métodos cuantitativos o semicuantitativos para el establecimiento de los niveles de exposición y efectos para el análisis y cuantificación del riesgo.

Por otra parte, la segunda metodología *“Procedimiento de Manejo de PCB durante el Mantenimiento de Equipos”* es una metodología semicuantitativa que, a partir de la estimación apreciativa de variables ambientales, pondera un puntaje general para categorizar la importancia del riesgo ambiental mediante una ecuación. Si bien se emplea una expresión matemática para el cálculo del riesgo, a las variables se les asignan valores dentro de un rango, por lo que la evaluación del riesgo es fundamentalmente cualitativa.

La tercera metodología analizada, correspondiente a la norma *“UNE 150008:2008”*, es una metodología semicuantitativa que, si bien formula en principio la evaluación del riesgo ambiental desde una perspectiva gráfica haciendo uso de un diagrama de causa y efecto, en la última etapa de evaluación propone la estimación del riesgo desde una ecuación matemática.

$$\text{Riesgo} = \text{Probabilidad/Frecuencia} \times \text{Gravedad de las consecuencias}$$

Sin embargo, la limitación de esta metodología consiste en que no se especifica el método de cálculo de la probabilidad y la gravedad de las consecuencias. Finalmente, es importante resaltar que esta norma propone el análisis de la incertidumbre de la evaluación, al igual que el *“Manual de Evaluación y Gestión del Riesgo Asociado a los COP del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia”*, el cual es un proceso distintivo de las metodologías cuantitativas de evaluación de riesgo.

Otro factor destacable en el análisis es el contexto de aplicación las metodologías revisadas. La primera concibe la evaluación del riesgo de compuestos orgánicos persistentes como los PCB's, teniendo en cuenta todos los niveles y vías de exposición, su transformación en los compartimientos ambientales y los efectos bióticos y abióticos en el ecosistema y en la salud humana.

Esta interpretación permite el abordaje de todos los escenarios de riesgo y las interacciones del contaminante en las matrices ambientales. Para implementar esta metodología se requiere el levantamiento de información primaria, como, por ejemplo, las dosis de exposición, la concentración de PCB's en las matrices ambientales y los datos epidemiológicos de los efectos sobre la salud. Este alto requerimiento se explica en la medida que este manual está dirigido a la gestión pública del riesgo, en otras palabras, las autoridades ambientales serían las responsables de llevar a cabo este tipo de evaluación, teniendo acceso a la información y a los recursos necesarios.

La segunda metodología abarca un contexto cerrado dentro del sector productivo centrado en las actividades de operación y mantenimiento de equipos de transformación eléctrica en el sector minero, en este proceso de evaluación del riesgo no se evalúa las vías de exposición al contaminante ni la toxicidad de este. Al ser una metodología semicuantitativa, los efectos ocasionados por PCB's son determinados a raíz del impacto generado, entendido como el *“deterioro de condiciones”*, sin calcular a ciencia cierta la magnitud exacta del impacto. Este supuesto le permite a esta metodología considerar efectos sociales y económicos en la evaluación del riesgo, factores que son más complejos de evaluar desde una metodología cuantitativa.

La tercera metodología comprende un contexto productivo general, sin dirigirse específicamente a compuestos orgánicos persistentes o sustancias químicas, sin embargo, gracias a este método se facilita la identificación de causas de posible riesgo, contemplando la postulación de escenarios de riesgo en el medio socioeconómico, dentro del cual se considera la salud como un parámetro de evaluación.

La limitación de esta última metodología, al igual que la segunda, es la cuantificación del riesgo, la cual no se presenta de manera explícita. Las metodologías cualitativas, si bien no permiten la estimación real del riesgo ambiental, permiten a las organizaciones realizar una aproximación de los escenarios de riesgo de manera rápida, con bajo requerimiento de información primaria, generando resultados fácilmente interpretables. Por otra parte, la evaluación de riesgos cuantitativa permite juzgar el grado de peligro objetivamente y desarrollar un paquete de medidas de gestión de riesgo (Melko, Ilevins, & Roja, 2012), como lo es un plan de comunicación de riesgo ambiental. Teniendo en cuenta lo anterior y el análisis de las limitaciones y el contexto de las metodologías de evaluación revisadas, se resuelve diseñar una metodología semicuantitativa para la evaluación del riesgo ambiental asociado a PCB's, teniendo en cuenta las variables de evaluación que se describirán en el siguiente apartado.

7.3 Selección de variables para el diseño metodológico de la evaluación del riesgo ambiental asociado a PCB's en transformadores instalados en redes distribución de energía de Codensa S.A E.S.P.

En primer lugar, cabe aclarar que en este estudio se diseñó una metodología de evaluación de riesgo semicuantitativa, cuyo objeto de estudio es la salud de la población presente en el área de influencia de las redes de distribución de energía.

Se resuelve adoptar un enfoque semicuantitativo, ya que además de realizar una aproximación al escenario de riesgo de exposición a PCB's, se incluyó la cuantificación de dicho riesgo. Las metodologías revisadas proponen algunas herramientas para la cuantificación del riesgo ambiental, sin embargo, estas no se adaptan a las necesidades de este diseño metodológico, ya sea por la disponibilidad de información primaria (cálculo de dosis de exposición o concentración de PCB's en el ambiente), o el enfoque cualitativo en el cálculo de variables de evaluación (asignación de valor en un rango predeterminado).

Con base al análisis de las metodologías revisadas y la anterior aclaración, se toman una serie de disposiciones que se enumeran a continuación.

1. Se conserva la estructura metodológica del “*Manual de Evaluación y Gestión del Riesgo Asociado a los COP del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia*”, que se fundamenta teóricamente en el marco de evaluación de la EPA, (1992).

Para la selección de variables de evaluación a partir esta metodología, se tomaron en cuenta las limitaciones en el acceso y levantamiento de información relacionada a: la identificación de efectos sobre el ecosistema producto de la exposición a PCB's, la evaluación de las vías de exposición al contaminante, y su transferencia o flujo en los compartimientos ambientales.

2. La delimitación del área de estudio es un punto importante para la implementación de la metodología del riesgo ambiental (EPA, 1992). Por consiguiente, este diseño está dirigido a la evaluación del riesgo ambiental asociado a PCB's en transformadores eléctricos instalados en las redes de distribución del perímetro urbano de Bogotá, el cual representa un factor estresante a la salud (Parkinson & et al, 2012).
3. Las variables seleccionadas de la segunda y tercera metodología hacen referencia a la identificación de actividades antropológicas causantes del riesgo de exposición a PCB's, lo que

permite plantear precisamente escenarios de riesgo según la fase operativa asociada a la actividad.

En ese sentido, se define evaluar la actividad antropológica en la fase de operación y mantenimiento de equipos de transformación eléctrica, en conformidad con la metodología *Procedimiento de Manejo de PCB durante el Mantenimiento de Equipos del ministerio de ambiente de Perú*, postulando a su vez los escenarios de riesgo, de acuerdo con la “*Norma UNE 150008:2008*”.

4. Una vez postulados los escenarios de riesgo, se procede a la delimitación de la muestra de transformadores que potencian el riesgo de exposición a PCB's, ya que la totalidad del inventario no presenta contenidos de esta sustancia en su aceite dieléctrico.

Por otra parte, se debe definir cuál es la sustancia específica de interés en la evaluación del riesgo ambiental. Si bien se ha determinado que los PCB's son el causante del riesgo a la salud, estos conforman un grupo de más de 209 congéneres, de los cuales sólo unos pocos hacen parte de las mezclas comerciales empleadas en el sector eléctrico (Astudillo, 2014).

5. La vía de exposición analizada desde el contexto del modelo es la exposición por inhalación, relacionada a la volatilización del contaminante bifenilo policlorado PCB (Dobson & Van Esch, 1993). Así, la transferencia del contaminante se aborda específicamente desde el suelo a la atmósfera (Ruiz, 2005). En este sentido, se hace una aproximación de la distribución o alcance de PCB's en el aire (Venier & Hites, 2010) para establecer las zonas más expuestas en el perímetro de Bogotá.
6. Con base en lo anterior, en el diseño de la metodología propuesta, se efectúa la cuantificación del riesgo desde el diseño de un modelo de comportamiento fisicoquímico del contaminante, que permite estimar la distribución de la exposición a PCB's en el área de estudio seleccionada, en este caso, el perímetro urbano de Bogotá. El desarrollo de este modelo se muestra en la sección 7.4.3.
7. La aplicación del modelo de comportamiento fisicoquímico de PCB's permite la cuantificación de la exposición en función del área de impacto, entendida como el alcance espacial del contaminante en el perímetro urbano de Bogotá. El área de impacto es una variable definida en la metodología “*Norma UNE 150008:2008*”, cuyos valores se describen según la extensión del riesgo (extenso o localizado).
8. Así mismo, para concluir la cuantificación, se delimitan las zonas de riesgo de exposición a PCB's mediante el análisis geoestadístico del área de estudio, generando clusters o conglomerados de los sitios de riesgo definidos por la Resolución 222 de 2011. Esta norma define como prioridad las plantas de tratamiento de agua para consumo humano, plantas de beneficio animal, plazas de mercado, industrias de alimentos, restaurantes y zonas de comida en centros comerciales, industrias farmacéuticas, hospitales e instituciones educativas (MADS, 2011).
9. Una vez cuantificada el área de impacto y definidas las zonas de riesgo de exposición a PCB's, la caracterización del riesgo se desarrolla en función del área impactada en dichas zonas. Es decir, el riesgo será mayor cuando la extensión del impacto es más amplia y se materializa en

una zona de riesgo, y será menor cuando la extensión del riesgo es más localizada y no se materializa en una zona de riesgo.

10. La interpretación de los resultados de la evaluación facilitó además, el establecimiento de las zonas prioritarias para la gestión del riesgo en el perímetro urbano de Bogotá. Esto se logró calculando el porcentaje de riesgo más alto en cada zona por unidad de área. Las zonas con mayor porcentaje de riesgo por unidad de área son prioritarias no sólo para la toma de medidas de prevención, control y minimización del riesgo, sino para dirigir la estrategia de comunicación del riesgo.
11. Si bien el objetivo final de la aplicación de este estudio en la organización, es la socialización del riesgo en la totalidad de zonas definidas, el alcance de esta estrategia en el estudio, está direccionada a generar los lineamientos de comunicación en la zona de riesgo prioritaria, favoreciendo la socialización coherente y objetiva del riesgo asociado a PCB's en transformadores eléctricos instalados en las redes de distribución de Energía de Codensa S.A. E.S.P.
12. El alcance de esta metodología no incluyó la evaluación de los efectos específicos producidos por la exposición a PCB's sobre la salud, ya que el modelo fisicoquímico de comportamiento de PCB's no permite determinar explícitamente la concentración del contaminante en una zona, más si el área en la que puede ser transportado en un tiempo definido.

Las disposiciones descritas y las variables seleccionadas para la evaluación del riesgo ambiental asociado a PCB's en transformadores instalados en las redes de distribución de Codensa S.A. E.S.P. en el perímetro urbano de Bogotá se resumen en la *Tabla 13*.

Tabla 13. Consolidación de la metodología cuantitativa de evaluación del riesgo de exposición asociado a PCB's en transformadores eléctricos de distribución en el perímetro urbano de Bogotá, Colombia

Proceso	Actividad	Resultado esperado
Definición del problema	Definición del objetivo de la evaluación	Definición del factor salud como objeto de evaluación y las limitaciones en el alcance de la evaluación
	Delimitación del área de estudio	Georreferenciación del área de estudio
	Definición del alcance de la metodología	Descripción del área de estudio
	Identificación de peligros en actividades	Postulación de escenarios de riesgo en la operación de equipos de transformación en redes de distribución
	Delimitación del objeto de estudio	Delimitación de la muestra de transformadores Identificación de la tipología de PCB's presentes en aceite dieléctrico de transformadores
Análisis del Nivel de Exposición	Determinación de las vías de exposición	Descripción de la inhalación como vía de exposición a PCB's
	Estimación de la transferencia en compartimiento ambiental	Diseño del modelo fisicoquímico del comportamiento de PCB's para el análisis de la transferencia del contaminante desde el suelo a la atmósfera
Análisis de Efectos	Descripción general de efectos a la salud	Identificación del riesgo a la salud por exposición a PCB's
Cuantificación de la exposición	Estimación del área de impacto	Estimación del área de impacto del riesgo como resultado del modelo fisicoquímico del comportamiento de PCB's para el análisis de la transferencia del contaminante desde el suelo a la atmósfera
	Determinación de la influencia de la exposición en zonas de riesgo	Definición del alcance espacial de la exposición a PCB's Determinación de zonas de riesgo a partir de los sitios definidos en la Resolución 222 de 2011
Caracterización	Definición de categorías de riesgo	Análisis geoestadístico del impacto del riesgo en las zonas de riesgo y

del riesgo	definición de categorías de riesgo	
	Definición de zonas prioritarias de riesgo de exposición a PCB's en el perímetro urbano de Bogotá	
Gestión del Riesgo	Comunicación del Riesgo	Postulación de los lineamientos que direccionan la estrategia de comunicación del riesgo en la zona de riesgo prioritaria

Fuente: Autor, 2018

7.4 Implementación de la Metodología semicuantitativa de evaluación del riesgo de exposición asociado a PCB's en transformadores eléctricos de distribución en el perímetro urbano de Bogotá, Colombia

El detalle procedimental de esta metodología de evaluación de riesgo ambiental será descrito a través de su implementación al caso aplicado en cuestión, como se evidenciará en los siguientes apartados.

7.4.1 Definición del problema

7.4.1.1 Definición del objetivo de la metodología de evaluación de riesgo ambiental

La metodología de evaluación del riesgo ambiental se orienta hacia la estimación de la exposición de la población a bifenilos policlorados (PCB's), teniendo en cuenta los efectos potenciales de esta sustancia química sobre la salud.

Si bien la metodología permite realizar una aproximación de la distribución de la sustancia de interés para determinar el área de impacto del contaminante, la magnitud de los efectos de esta sustancia no pueden ser establecidos con certeza, ya que en la evaluación de riesgo no se cuantifica la dosis de exposición del contaminante en el ambiente, definido como el estimado de la cantidad de una sustancia química que ingresa al organismo de una persona cuando esta última entra en contacto con la sustancia (ASTDR, 2008).

El uso de cocientes de riesgo como alternativa para la determinación de los efectos reales de una sustancia química en la salud, consiste en la comparación directa de los niveles de exposición esperados, con los niveles de efectos considerados suficientemente bajos como para proteger la salud o el medio ambiente (Dirección Desarrollo Sectorial Sostenible, 2007). Sin embargo, la determinación explícita de la concentración de exposición en el área de estudio no es posible mediante el modelo fisicoquímico de comportamiento de PCB's, por lo que el cálculo de cocientes de riesgo está por fuera del alcance de la metodología de evaluación. Teniendo en cuenta lo anterior, el objetivo de esta metodología no incluye la evaluación de los efectos específicos producidos por la exposición a PCB's sobre la salud.

Así, el objetivo de la metodología de evaluación del riesgo ambiental asociado a PCB's en transformadores eléctricos instalados en las redes de distribución de Codensa S.A. E.S.P., es la estimación de la distribución espacial de la exposición al contaminante en el perímetro urbano de Bogotá, mediante el diseño y aplicación de modelo fisicoquímico del comportamiento de la sustancia de interés, con el fin de establecer las zonas prioritarias para la gestión del riesgo, que fundamenten los lineamientos para la estrategia de comunicación del riesgo ambiental.

7.4.1.2 Definición del alcance de la metodología de evaluación de riesgo ambiental

Delimitación del área de estudio

Para la definición del problema, se hace indispensable la descripción del sitio, denominado en este documento como descripción del área de estudio, referido al establecimiento del alcance espacial de la evaluación del riesgo ambiental, localización, topografía, características climáticas e hidrológicas importantes y el interés especial de la zona (EPA, 1998).

Si bien el riesgo ambiental asociado a PCB's está presente en la totalidad del área influenciada por las redes de distribución de Codensa S.A E.S.P., en este estudio se realiza la delimitación de esta área al perímetro urbano de Bogotá, ya que en este sistema se puede cuenta con la disponibilidad de información para la evaluación de las diferentes variables de interés.

Así, Bogotá cuenta con un inventario de infraestructura que registra la ubicación de los sitios de riesgo definidos por la Resolución 222 de 2011 (UAECD, 2017), útil para la definición geostadística de zonas de riesgo, y además cuenta con el registro de los valores anuales promedio de las variables ambientales (RMCAB, 2016) definidas en el modelo de comportamiento fisicoquímico de los PCB's, como la velocidad y dirección del viento, y la temperatura.

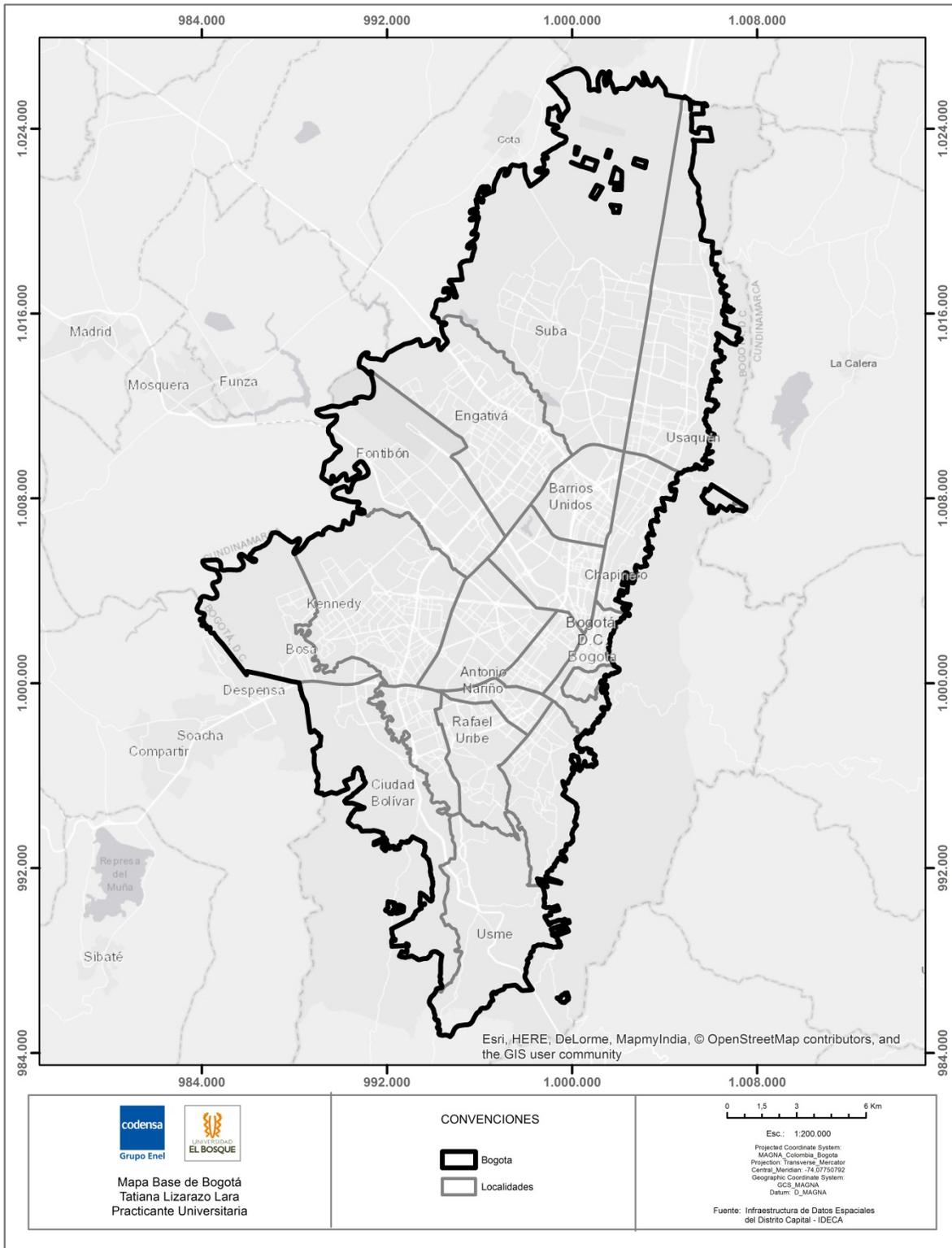
Por último, la densidad poblacional de la capital colombiana es superior a la de los demás municipios del área de influencia de la actividad de distribución energética de Codensa S.A E.S.P., lo que hace más representativa la evaluación del riesgo de exposición del contaminante. Cabe resaltar que Bogotá es el municipio con mayor población en relación con los otros 107 municipios que atiende en el departamento de Cundinamarca, con una tasa de crecimiento para el periodo 2015-2020, de 1,90% (Secretaría Distrital de Planeación de Bogotá, 2014).

➤ *Georreferenciación del área de estudio*

Para la georreferenciación del área de estudio empleó la aplicación ArcMap del software de información geográfica ArcGis en su versión 10.4. Como primera medida se ubicó espacialmente el área de estudio, a saber, el área urbana de Bogotá, empleando el polígono del perímetro urbano de Bogotá y la capa de Unidades de Planeamiento Zonal (UPZ) de la Secretaría Distrital de Ambiente, disponible en la Infraestructura de Datos Espaciales del Distrito Capital IDECA (UAECD, 2017).

Para efectos de practicidad en el manejo de la información geográfica en el software, se fusionaron las dos capas descritas anteriormente, obteniendo como resultado un mapa de localización del área de estudio que representa el perímetro urbano de Bogotá subdividido en las unidades de planeamiento zonal, como se presenta en la *Figura 8*.

Figura 17. Localización del área de estudio de la evaluación de riesgo ambiental asociado PCB's



Fuente: Autor, 2018

➤ **Descripción del área de estudio**

Bogotá es la capital de la República de Colombia, se encuentra ubicada en la cordillera oriental, en el centro geográfico del país, el cual se localiza al norte de Suramérica. Bogotá se sitúa en el borde oriental de la Sabana de Bogotá, la altiplanicie más alta de los Andes colombianos, cuya altura promedio es de 2.600 metros sobre el nivel del mar (Secretaría General de Bogotá, 2012).

Esta ciudad se encuentra dentro de la zona de confluencia intertropical, por lo que la gobiernan dos épocas de lluvia; una en la primera mitad del año en los meses de marzo, abril y mayo y otra en la segunda mitad, en los meses de septiembre, octubre y noviembre (Secretaría Distrital de Salud, 2014-2017). Bogotá no cuenta con estaciones y tiene un clima homogéneo durante todo el año con temperatura media de 14°C (57°F) (Secretaría General de Bogotá, 2012).

El área de estudio se encuentra situada en las coordenadas Latitud Norte: 4° 35'56" y Longitud Oeste de Greenwich: 74°04'51" (Secretaría General de Bogotá, 2017). Con base en la georreferenciación desarrollada, es posible validar que el perímetro urbano hace referencia al límite que separa las zonas rurales del Distrito Capital, de esta forma, Bogotá colinda con los municipios de Cota, Funza, Mosquera y Soacha.

Es válido aclarar que la localización del perímetro urbano no implica que no existan zonas con economías de producción primaria al interior de este perímetro, o zonas urbanizadas al exterior de este. Teniendo en cuenta los atributos de la capa georreferenciada del perímetro urbano de Bogotá, se puede validar que el área de estudio corresponde a 457084211,73m², equivalentes a 45708.42km².

Según la proyección poblacional por localidades de Bogotá, publicado por la Secretaría Distrital de Planeación en convenio con el Departamento Administrativo Nacional de Estadística, la población sería de 8.080.734 habitantes para el 2017, y 8.181.047 habitantes para el 2018 (Secretaría Distrital de Planeación, 2016). Este valor puede ser variable en relación con la evaluación del riesgo ambiental, ya que algunas zonas de diferentes localidades no hacen parte del perímetro urbano.

Identificación peligros en la operación de equipos de transformación en redes de distribución de Codensa S.A E.S.P.

Según la EPA (1998), la definición del problema también abarca la identificación de los factores causantes del estrés ambiental, en este caso particular, el factor evaluado es una sustancia química, los bifenilos policlorados PCB's, presentes en el aceite dieléctrico de algunos transformadores instalados en redes de distribución de Codensa S.A E.S.P.

Los transformadores eléctricos son equipos herméticamente sellados industrialmente (TTE, 2017), es decir, que por sí solos, los PCB's no podrían entrar al ambiente y someter a la población a algún grado de exposición. Sin embargo, esta condición puede cambiar si el aceite dieléctrico entra en contacto con el ambiente, producto de alguna falla en el equipo (TREDI, 2018).

Las situaciones que podrían generar algún tipo de exposición a PCB's son el derrame y la fuga de aceite dieléctrico, situaciones identificadas y normalizadas por la Gerencia de Infraestructura y Redes (I&N) del grupo Enel Colombia. El Instructivo Operacional No. IO 1160 Versión No.1 fecha (2017), cuyo asunto es la gestión de fugas, goteos o derrames de aceites dieléctricos, combustibles y

electrolitos, define claramente estas situaciones de peligro. En dicho documento se define derrame como el vertimiento o escape superficial involuntario y momentáneo de una sustancia que puede ser rápidamente detectado. Por otra parte, se define fuga como la pérdida de una sustancia, no atribuible a procesos fisicoquímicos u operativos normales, de difícil detección y que ocurren en periodos de tiempo definidos o indefinidos (I&N Enel, 2017).

➤ ***Postulación de escenarios de riesgo***

A pesar de que el derrame y la fuga de aceite dieléctrico sin contenido de PCB's generan un riesgo ambiental por las características peligrosas del fluido (Astudillo, 2014), en esta evaluación de riesgo se consideran los escenarios de riesgo asociados al derrame o fuga de aceite dieléctrico con cierta concentración de PCB's, ya que la metodología se dirige a la evaluación de la exposición poblacional a esta sustancia química.

Mediante el Instructivo Operacional IO No.598, la organización realiza la identificación de sus aspectos e impactos ambientales, y define una metodología de evaluación de riesgos empleando coeficientes que se evalúan cualitativamente (I&N Enel, 2017). Si bien esta metodología no estima cuantitativamente el riesgo de exposición a PCB's, si permite la identificación de escenarios de riesgo asociados y los controles operacionales pertinentes (I&N Enel, 2017). Los escenarios de riesgo identificados por el Grupo Enel se muestran a continuación.

Derrame de aceite dieléctrico con contenido de PCB's en transformadores instalados en redes de distribución del perímetro urbano de Bogotá

El Instructivo Operacional 868, referente a la preparación y respuesta ante incidentes o emergencias ambientales, elaborado por la Gerencia de Infraestructura y Redes (I&N) del Grupo Enel Colombia, define los derrames como situaciones que pueden representar un incidente o una emergencia ambiental, clasificación realizada dependiendo de la capacidad de respuesta de la organización.

Un derrame es un incidente ambiental cuando bajo condiciones no controladas puede conllevar a un daño ambiental permanente, generando pérdidas e impactos negativos sobre varios o todos los elementos del medio ambiente (I&N Enel, 2017), A pesar que en este caso el derrame no supera la capacidad de respuesta de la organización, se presenta un escenario de riesgo, denominado en esta metodología como “Derrame de aceite dieléctrico con contenido de PCB's en transformadores instalados en las redes de distribución del perímetro urbano de Bogotá”.

Figura 18. Ilustración del escenario de riesgo: Derrame de aceite dieléctrico



Fuente: (I&N Enel, 2017)

Derrame masivo de aceite dieléctrico con contenido de PCB's en transformadores instalados en redes de distribución del perímetro urbano de Bogotá

Por otra parte, un derrame es una emergencia cuando se presenta la alteración o interrupción intensa y grave de las condiciones normales de funcionamiento u operación de una comunidad, obligando la reacción inmediata de la organización, y requiriendo del apoyo de las instituciones del Estado, los medios de comunicación y de la comunidad en general (I&N Enel, 2017).

Figura 10. Ilustración del escenario de riesgo: Derrame masivo de aceite dieléctrico



Fuente: (I&N Enel, 2017)

Entonces, el escenario de riesgo corporativamente definido es el “Derrame masivo de aceite dieléctrico en subestaciones, redes de distribución y bodegas” (I&N Enel, 2017), para el caso puntual de evaluación, se define el escenario de riesgo como el “Derrame masivo de aceite dieléctrico con contenido de PCB's en transformadores instalados en las redes de distribución del perímetro urbano de Bogotá”. El derrame puede ser atendido rápidamente mediante los controles operacionales definidos en el instructivo citado, que incluyen la contención, aislamiento y confinación del derrame, además de la

recolección de residuos de la remediación, la señalización del área afectada y el uso de equipo de protección personal según las características de las actividades desarrolladas (I&N Enel, 2017).

En ambos escenarios de derrame, el volumen de aceite que entra en contacto con el ambiente es mayor en un derrame que en una fuga, por lo que la magnitud del riesgo en un derrame es mayor (Tariq Jan, Afzal, & Zia Khan, 2015). En el periodo 2004-2012 se registraron 81 derrames controlados en la operación y mantenimiento de las redes de Codensa S.A. E.S.P., sin embargo, no es posible identificar en cuáles de estos derrames el aceite contenía PCB's (HSE, 2018).

Fuga activa (goteo) de aceite dieléctrico con contenido de PCB's en transformadores instalados en redes de distribución del perímetro urbano de Bogotá.

El Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente PNUMA dirigido a productos químicos, refleja que las fugas de aceite comprenden un evento más frecuente, pero de mayor dificultad de detección que un derrame, entonces, la fuga es un escenario de riesgo que implica una mayor duración en la exposición del contaminante. En otras palabras, la duración del riesgo asociado a la exposición a PCB's puede ser mayor en una fuga que en un derrame (PNUMA, 2002).

La función del tanque en el transformador es ser un recipiente para el aceite que contiene. Sin embargo, la falla en el tanque puede ocurrir debido al estrés ambiental, corrosión, alta humedad y radiación solar, lo cual resulta en una fuga o grietas en las paredes del tanque (Tariq Jan, Afzal, & Zia Khan, 2015). El número de fugas registradas en el periodo 2015-2016 es de 376, de las cuales 231 fueron corregidas inmediatamente (HSE, 2018). Esta cifra supera casi tres veces el número de derrames en un periodo de tiempo 4 veces menor. El escenario de riesgo descrito se ilustra en la *Figura 11*.

Figura 11. Ilustración del escenario de riesgo: Fuga de aceite



Fuente: (I&N Enel, 2017)

Cada empresa colaboradora o unidad responsable de atender este tipo de situación debe diligenciar los formatos de “Registro de Fugas de Aceite en Equipos de Distribución” (RG02-IO1160)” según aplique y remitir copia a la División HSE durante los primeros 10 días cada mes (I&N Enel, 2017). Cada registro del mes debe contener la información de los meses anteriores consolidando así un reporte anual. Dado lo anterior, la fuga de aceite dieléctrico es una eventualidad sujeta de registro y control en el sistema de gestión ambiental, para este objetivo se cuenta con una base de datos “Registro de

Fugas”, donde se reporta este tipo de eventos ambientales, tanto en instalaciones de distribución, como en subestaciones de alta y media tensión (I&N Enel, 2017).

Delimitación del objeto de estudio en la evaluación del riesgo ambiental

➤ *Definición de la muestra de transformadores eléctricos a evaluar*

Para definir la muestra de transformadores a evaluar, se accedió a la base de datos interna que contiene el inventario de transformadores de Codensa S.A E.S.P., reportado ante el IDEAM, con periodo de balance [01/01/2016 - 31/12/2016]. Esta base de datos se denomina Sabana de Información del Capítulo II, y se encuentra en formato Microsoft Excel.

En primer lugar, se seleccionó la *Sección I* de la sabana de información, donde se encuentran los registros asociados al inventario de equipos en uso (*PCB - Equipo(s) en Uso*), ubicada en la primera hoja de cálculo de la base de datos. Se hizo este primer filtro de información ya que los equipos en desuso, aunque si pueden presentar contenidos de PCB's, tienen un plan de gestión orientado a su desinstalación (HSE, 2017).

A continuación, se filtraron los registros por tipo de equipo en los valores *Transformador eléctrico*, ya que esta es la fuente de riesgo analizada en esta metodología de evaluación de riesgo ambiental. En segundo lugar, teniendo en cuenta el área de estudio delimitado, se filtraron los registros de transformadores por *Departamento* en los valores correspondientes a *Bogotá*.

Ahora bien, para el análisis del riesgo ambiental asociado a PCB's en transformadores eléctricos instalados en las redes de distribución de energía de Codensa S.A. E.S.P, es importante tener en cuenta que el valor de la concentración del en aceite dieléctrico haya sido determinado. Dicha concentración se ha establecido en el 31,7% del inventario de transformadores de Codensa S.A E.S.P. mediante el análisis cuantitativo de PCB's con la técnica de cromatografía de gases con detector de captura de electrones (Codensa, 2016).

Por lo tanto, se filtraron nuevamente los registros, esta vez en el campo *¿Se hizo caracterización?*, en los valores correspondientes a *Si*, para un total de 12.408 equipos. Los transformadores en esta selección arrojaron resultados de concentración entre 0 y 136ppm, aquellos con concentraciones de 0 ppm fueron sustraídos de la muestra porque no presentan un riesgo asociado a PCB's. La muestra en este punto se redujo a un total de 11288 transformadores.

De esta muestra de transformadores se seleccionaron aquellos cuya ubicación geográfica no estuviese duplicada, ya que esta condición puede indicar que los transformadores pertenecen a subestaciones de energía (porque se concentran en una ubicación geográfica definida), y no a redes de distribución. Por otra parte, la duplicidad en la ubicación geográfica también puede indicar que el registro no ha sido actualizado en la Sabana de Información, o que existe un error en este (HSE,2018). Por esta razón se empleó la herramienta Microsoft Excel versión 365 para eliminar estos registros.

Una vez eliminados los transformadores con ubicaciones duplicadas (5,64%), se obtuvo una muestra de 10651 transformadores de distribución eléctrica. Estos equipos fueron georreferenciados con el objetivo de abstraer los equipos ubicados en el perímetro urbano, que serán finalmente los equipos

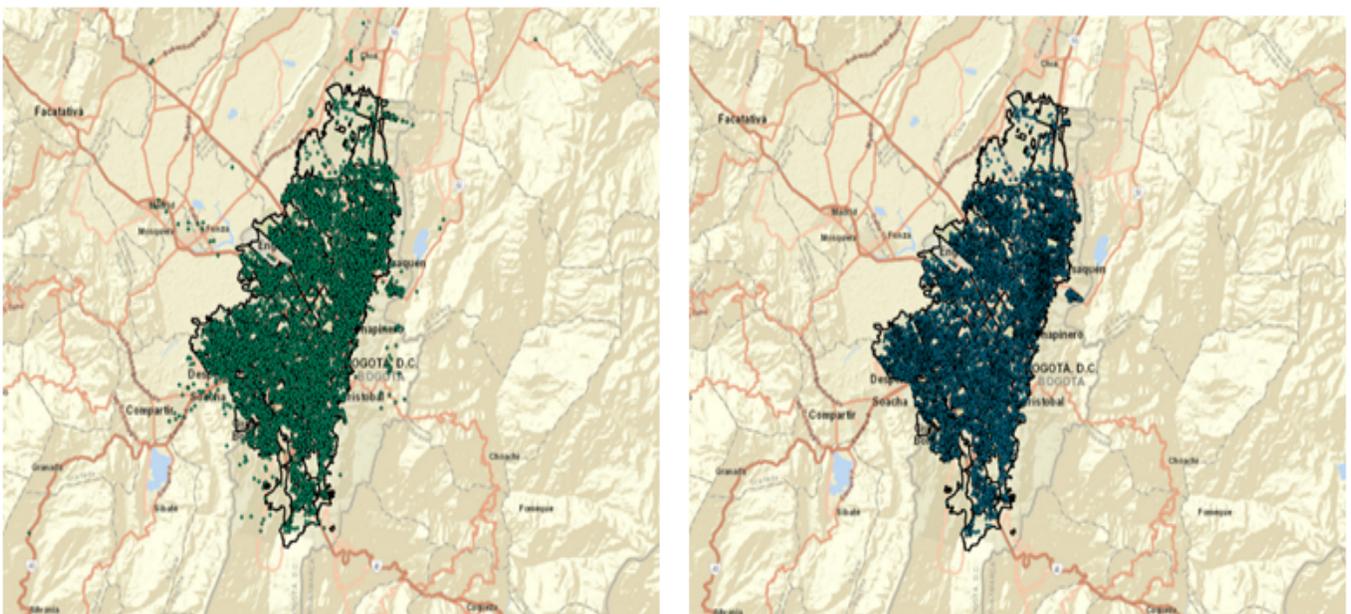
objeto de análisis en la metodología de riesgo. Dicha muestra es de 10381 transformadores como se explicará a en el siguiente apartado.

Georreferenciación de los transformadores eléctricos objeto de estudio en el área de estudio definida

En esta georreferenciación, también se empleó la aplicación ArcMap del software de información geográfica ArcGis en su versión 10.4. En primer lugar, se transformaron las coordenadas geográficas sexagesimales de cada transformador registrado en la Sabana de Información del Capítulo II, a una única coordenada de longitud y latitud expresada en grados. Esta información se cargó al software como una tabla de datos espaciales.

A continuación, se presenta la vista de transformadores georreferenciación en el perímetro urbano de Bogotá. Como se puede evidenciar en la *Figura 12*, fue necesaria la corrección de la información, eliminando los puntos ubicados fuera de este perímetro mediante la intersección espacial entre la capa de transformadores y la de perímetro urbano de Bogotá, usando la herramienta *Analysis Tools – Overlay- Intersect*.

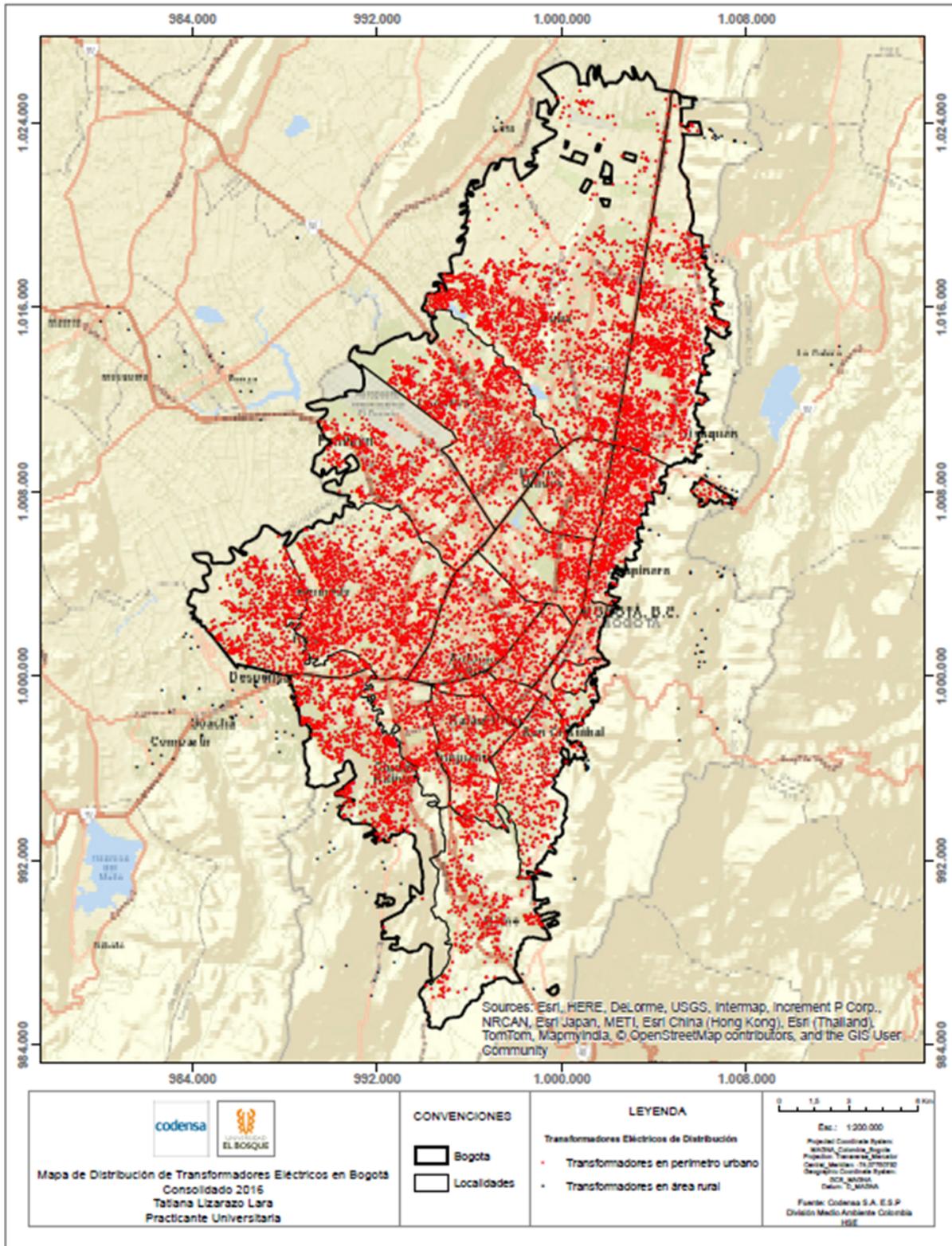
Figura 12. Vista de la delimitación de transformadores eléctricos objeto de estudio en el perímetro urbano de Bogotá



Fuente: Autor, 2018.

Con base en la información geográfica del área de estudio y la selección de transformadores eléctricos objeto de evaluación de riesgo ambiental asociado a PCB's, se empleó el mismo software de georreferenciación para generar un mapa de distribución de transformadores eléctricos instalados en redes de distribución de energía en el perímetro urbano de Bogotá, como se muestra en la *Figura 13*.

Figura 13. Mapa de distribución de transformadores eléctricos instalados en redes de distribución objeto de evaluación de riesgo ambiental asociado a PCB's



Fuente: Autor, 2018

Identificación de la tipología de PCB's presentes en aceite dieléctrico de transformadores

Antes de dar inicio a la identificación de la tipología de PCB's que se encuentra efectivamente en la muestra de transformadores objeto de estudio, se aclaran algunas consideraciones que direccionan esta tarea.

Los equipos fabricados después del 2013 cuentan con certificados que validan que los equipos se encuentran libres de PCB's. Los equipos fabricados hasta 1980 tienen una alta probabilidad de tener contenidos de PCB's, debido que hasta esta fecha se prohibió mundialmente la fabricación de esta sustancia, sin embargo, los equipos fabricados después de 1980, de no tener un certificado libre de PCB, se consideran también como sospechosos (HSE, 2017).

A los equipos que pueden presentar contenidos de PCB's dadas las condiciones de fabricación, se les realiza un análisis cuantitativo de PCB's mediante cromatografía de gases de alta resolución con detector de captura de electrones, de acuerdo con los métodos de la American Society for Testing and Materials (ASTM), acogiéndose a las disposiciones del artículo 6 del capítulo II de la Resolución 222 del 2011, que establece los protocolos para el muestreo y análisis de PCB's en equipos.

Los informes de las cromatografías señalan el tipo de PCB que se presenta en la muestra de aceite dieléctrico. Este dato constituye la información de entrada para la determinación de los congéneres o mezclas comerciales de PCB's que podrían entrar al ambiente dada la fuga o derrame de aceite dieléctrico en transformadores de distribución.

Después de revisar los informes cromatográficos (2003-2017), se determinó que la mezcla comercial de PCB's predominante en el aceite dieléctrico de la muestra de estudio de transformadores eléctricos de Codensa S.A E.S.P es el Aroclor 1260, los resultado de la revisión se muestran en la *Tabla 14*.

Tabla 14. Análisis de los informes de resultados del análisis de PCB's en muestras de aceite dieléctrico

Periodo	Compuesto	Método	Ejecutor	Observación
2003-2008	Aroclor 1016	ASTM D4059-96	Universidad de Los Andes Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental	El informe cromatográfico discrimina la concentración determinada por tipo de Aroclor, en las muestras analizadas únicamente se determinaron concentraciones de Aroclor 1260
	Aroclor 1221			
	Aroclor 1232			
	Aroclor 1242			
	Aroclor 1248			
	Aroclor 1260			
2009-2012	Aroclor 1016	ASTM D4059-00	-Universidad Industrial de Santander Laboratorio de Cromatografía - Laboratorio Ambiental Lito S.A	El informe cromatográfico presenta los resultados de concentración de las muestras como PCB's totales, es decir, no se discriminan las concentraciones determinadas en las muestras por tipo de Aroclor
	Aroclor 1221			
	Aroclor 1232			
	Aroclor 1242			
	Aroclor 1248			
	Aroclor 1254			
	Aroclor 1260			

Fuente: Tomado de los informes de resultados del análisis de PCB's en muestras de aceite dieléctrico 2003-2012

De acuerdo con la información analizada, únicamente se puede conocer con certeza la determinación de concentraciones de Aroclor 1260 en el aceite dieléctrico de los transformadores de distribución de energía, por lo que cabe la posibilidad que desde el año 2009 se hallan presentado concentraciones de otras mezclas comerciales de bifenilos policlorados en el aceite dieléctrico de los equipos.

En el Seminario de Divulgación de la Experiencia en Colombia en el Tratamiento de Aceite y Descontaminación de Transformadores con Contenidos de PCB's, el ingeniero químico coordinador de las pruebas para el análisis de PCB's del laboratorio TRANSEQUIPOS, acreditado por el IDEAM para realizar los análisis cromatográficos del Proyecto Demostrativo de Declorinación en Colombia, corroboró el resultado la revisión de la tipología de PCB's en la muestra de transformadores de Codensa S.A. E.S.P., expresando que esta mezcla comercial es típica en aceite dieléctrico de transformadores (TRANSEQUIPOS, 2018).

Por lo tanto, se establece el Aroclor 1260 como la sustancia de interés es la evaluación de riesgo ambiental. Este aroclor es una mezcla compleja de diferentes congéneres de PCB's, preparados mediante la clorinación de bifenilos, los dos últimos dígitos de su nomenclatura indican el porcentaje de cloro en la mezcla (60%) (ASTDR, 2000). El porcentaje aproximado de PCB's en este aroclor se muestra en la *Tabla 15*.

Tabla 15. Porcentaje de PCB's presentes en la mezcla comercial Aroclor 1260

Fórmula empírica de PCB	Porcentaje en peso (g)
C12H9Cl	0.02
C12H8Cl2	0.08
C12H8Cl3	0.21
C12H8Cl4	0.35
C12H8Cl5	8.74
C12H8Cl6	43.35
C12H8Cl7	38.54
C12H8Cl8	8.27
C12H8Cl9	0.70
Masa molecular promedio	378 g/mol

Fuente: Tomado de (ASTDR, 2000).

7.4.2 Análisis del nivel de exposición a PCB's: Aroclor 1260 en el perímetro urbano de Bogotá

7.4.2.1 Determinación de las vías de exposición

Si bien las vías de exposición a PCB's más estudiadas han sido el consumo de alimentos contaminados y la absorción cutánea en lugares de trabajo, la inhalación se ha considerado también como una vía fundamental de exposición a PCB's, favorecida por el proceso de redistribución de la sustancia en el medio ambiente (Dobson & Van Esch, 1993).

Esta redistribución tiene lugar gracias a la volatilización de la sustancia contaminante desde el suelo y el agua hacia la atmósfera, transportándose largas distancias en el aire en forma de partículas o vapor (Cortés & et al., 2016), este transporte se relaciona directamente con el peso de este contaminante; en general, entre más liviano es el PCB, mayor distancia de transporte puede alcanzar desde la fuente de emisión (Dobson & Van Esch, 1993). El Aroclor 1260 puede ser considerado como una mezcla de PCB's pesada debido a su composición (ONUUDI, 2017), lo cual podría limitar su proceso de transporte en la atmósfera, pero no suprimirlo completamente. El estudio del transporte de PCB's en la atmósfera ha permitido la detección de esta sustancia en sitios alejados desde la fuente de emisión, como por ejemplo en la nieve y el agua de mar (Grech, & et al., 2017), por lo cual se ha concluido que los PCB's se encuentran en todo el planeta (Cortés & et al., 2016).

En la atmósfera, el proceso de transformación predominante puede ser la reacción en fase de vapor de los PCB's con radicales hidroxilos (formados fotoquímicamente por la luz solar), la semivida estimada de esta reacción en la atmósfera oscila entre 10 días para el monoclorobifenilo y año y medio para el heptaclorobifenilo (Dobson & Van Esch, 1993), el cual compone el 38,54% de la mezcla comercial del Aroclor 1260 (Troisi & et al., 2001). Por esto, a pesar que la mezcla estudiada de PCB's podría desplazarse lentamente en la atmósfera, la velocidad de la reacción del Aroclor 1260 en esta matriz favorecería su permanencia en el ambiente y por ende, el aumento del riesgo de exposición por inhalación.

Finalmente, los PCB's se eliminan de la atmósfera mediante los fenómenos de sedimentación húmeda o seca, llegando nuevamente a suelos o cuerpos de agua, donde comienzan un nuevo ciclo de volatilización (Harner & Jones, 1995), prolongando así el tiempo de exposición del contaminante en el medio ambiente. Existe evidencia indirecta de la absorción de PCB's por inhalación en humanos, una amplia variedad de congéneres han sido detectados en fluidos corporales en personas que frecuentan ambientes ocupacionales expuestos a la sustancia o sitios contaminados como escuelas donde la concentración de PCB's ha sido medida (International Agency for Research on Cancer, 2016).

7.4.2.2 Estimación de la transferencia del contaminante en el compartimiento ambiental

Para la estimación de la transferencia del Aroclor 1260 en el ambiente, se diseña un modelo fisicoquímico de comportamiento de esta mezcla comercial de PCB, que comprende a su vez la herramienta para cuantificar el riesgo ambiental de esta sustancia en el diseño metodológico de evaluación. Cabe resaltar que basado en la vía de exposición seleccionada para la evaluación del riesgo (inhalación), la transferencia del contaminante debe ser evaluado desde la matriz suelo a la atmósfera (Guaiteiro, 2010) (Venier & Hites, 2010).

Es importante tener presente que el modelo y la hipótesis para cuantificar el riesgo en función de la exposición puede afectar significativamente el resultado de cualquier evaluación de riesgo ambiental. Por lo tanto, se debe ser cuidadoso con la selección del modelo, la identificación de variables y la enumeración de supuestos atmosféricos (Hydro-Quebec Research Institute, 1988).

Debido a que los modelos espaciales de transporte de contaminantes han desarrollado herramientas informáticas de georreferenciación y estiman de manera aproximada las condiciones y procesos ambientales, además de aplicarse durante períodos específicos, los modelos se pueden validar si las mediciones están disponibles (Ilyina, 2007). Sin embargo, en esta metodología no está contemplada la validación del modelo fisicoquímico de comportamiento del Aroclor 1260 mediante las mediciones propuestas.

En conclusión, para la estimación de la transferencia en el compartimiento ambiental y la evaluación de la exposición como actividad fundamental de la evaluación del riesgo, se diseña un modelo fisicoquímico a partir de los modelos revisados en el siguiente apartado, que fundamenta la aproximación de la descripción del comportamiento del Aroclor 1260 una vez entra en contacto con el ambiente, dada la materialización del escenario de riesgo de fuga o derrame de un transformador de distribución cuyo aceite dieléctrico presente contenido de PCB's.

7.4.2.2.1 Revisión de estudios fisicoquímicos de PCB's para la selección de variables de interés para el diseño del modelo fisicoquímico de comportamiento del Aroclor 1260

Los compuestos organoclorados como los PCB's y en general los hidrocarburos aromáticos policíclicos PAH's, a pesar de no ser volátiles, viajan miles de kilómetros por el aire desde su punto de emisión, llegando a contaminar áreas prístinas del planeta (Guaiteiro, 2010). El análisis cuantitativo del transporte atmosférico de contaminantes de largo alcance es comprendido mediante los principios básicos de la química (Baird, 2004).

Estas aproximaciones han sido descritas mediante modelos matemáticos con fundamento fisicoquímico, que han demostrado que los contaminantes orgánicos persistentes como los PCB's poseen la volatilidad suficiente como para evaporarse lentamente y desplazarse desde los lugares temporales donde se encuentran a temperaturas ambientales normales (Baird, 2004).

Para la selección de variables fisicoquímicas que permitan estimar la transferencia del Aroclor 1260 desde el suelo a la atmósfera, y por consiguiente cuantificar el riesgo ambiental de este contaminante, se revisaron tres artículos científicos, definiendo para cada uno la institución o investigadores desarrolladores del estudio, el objetivo del mismo, las ecuaciones asociadas al modelo fisicoquímico y las variables fisicoquímicas de evaluación.

Artículo científico "Octanol-Air Partition Coefficient as a Predictor of Partitioning of Semi-Volatile Organic Chemicals to Aerosols" (Finizio, Mackay, Bidelmang, & Harner, 1997).

➤ **Desarrolladores del modelo** (Finizio, Mackay, Bidelmang, & Harner, 1997)

Este estudio fue adelantado por Finizio, A., del Departamento Ambiental de Ciencias Animales y Vegetales de Italia, Mackay, A., del Departamento de Estudios Ambientales y Recursos de la Universidad de Trent en Ontario, Canadá y Bidleman, L., & Harner, T., del Servicio Ambiental y Atmosférico de Ontario, Canadá.

➤ **Objetivo del estudio** (Finizio, Mackay, Bidelmang, & Harner, 1997)

En este estudio pretende validar que una cantidad experimental puede ser usada para correlacionar el coeficiente de partición, en base de volumen (Kp) con el coeficiente de partición octanol-aire, en base de volumen (KoA), teniendo en cuenta que este último puede ser medido directamente (Harner & Mackay, 1995; Harner & Bidleman, 1996). El objetivo del estudio se desarrolla estableciendo una relación teórica entre (Kp) y (KoA), donde los datos para estas variables se compilan para discutir la hipótesis de correlación entre ellas.

El estudio también pretende estimar la relación Kow/Kaw , donde (Kow) es el coeficiente de partición octanol-agua y (Kaw) es el coeficiente de partición aire-agua.

➤ **Ecuaciones asociadas al modelo fisicoquímico** (Finizio, Mackay, Bidelmang, & Harner, 1997)

Kp se entiende como una función de las propiedades de los compuestos orgánicos semivolátiles (SOC's) y la naturaleza del material en partículas. Los datos experimentales de partición han sido convencionalmente correlacionados con éxito por medio de la ecuación [1] de la siguiente forma:

$$\text{Log}_{Kp} = m \log_{Pl^0} + b \quad [1]$$

Donde Kp es coeficiente de partición en $\frac{m^3}{ug^{-1}}$, m y b son constantes y Pl^0 es la presión vapor líquido subenfriado. Luego a partir de la ecuación [1], se obtiene la ecuación [2]

$$Kp = \frac{10^{-6}RT f_{oM}}{M_{oM} \gamma_{oM} Pl^0} \quad [2]$$

Donde R es la constante de gases, T es temperatura, f_{oM} es la fracción orgánica de la partícula que puede absorber SOC gaseosos, M_{oM} es la masa molecular media de la fase orgánica en $\frac{g}{mol^{-1}}$, y γ_{oM} es coeficiente de actividad del químico en la fase orgánica. El logaritmo natural del coeficiente de partición se expresa mediante la ecuación [3].

$$\text{Log}_{Kp} = \text{Log}_{KoA} + \text{Log} \left(1.22 \times 10^{-12} \times [f_{oM} \left(\frac{M_o}{M_{oM}} \right) \left(\frac{\gamma_o}{\gamma_{oM}} \right)] \right) \quad [3]$$

Donde KoA es el coeficiente de partición octanol-aire en base volumen, M_o es la masa molecular del octanol $\frac{g}{mol^{-1}}$, y γ_o es el coeficiente de actividad del químico en octanol.

Una gráfica log-log de Kp versus a KoA debe ser lineal con una pendiente de 1 y una intersección que depende de f_{oM} y la magnitud relativa de M_o, M_{oM}, γ_o y γ_{oM} . La expresión lineal se muestra en la ecuación [4].

$$Kp = B KoA \quad [4]$$

$$\text{Donde } B = 1.22 \times 10^{-12} \times [f_{oM} \left(\frac{M_o}{M_{oM}} \right) \left(\frac{\gamma_o}{\gamma_{oM}} \right)] \quad [5]$$

Así, se compilaron y trazaron los datos para Kp y KoA en las mismas temperaturas con la expectativa que los datos revelaran una pendiente de 1 en un diagrama de registro. Alternativamente, y de manera equivalente, la relación $\frac{Kp}{KoA}$ o $\frac{Kp}{B}$ se pudo deducir, y la utilidad de la ecuación [5] como correlación se puede evaluar a partir de la magnitud y constancia de B .

Para compuestos organoclorados la ecuación que describe el comportamiento fisicoquímico se obtiene mediante la ecuación [6] con una correlación de $R^2 = 0.79$.

$$\text{Log}_{Kp} = 0.55 \text{Log}_{KoA} - 8.23 \quad [6]$$

Donde $B = 1.50 \times 10^{-12}$. También se obtiene que $\frac{K'p}{Kp} = 3$, donde $K'p$ es el coeficiente adimensional de partición de gas partícula, en base volumen.

➤ **Conclusiones del modelo fisicoquímico** (Finizio, Mackay, Bidelmang, & Harner, 1997)

Se sugiere que el coeficiente de partición octanol-aire KoA es un excelente descriptor de la partición de gas a aerosol, así, la relación $\frac{K'p}{Kp}$ sugiere que el octanol tiene propiedades de sorción similares a partículas de aerosol. Esta última correlación es atractiva para fines de modelado en vista de su simplicidad.

- **Identificación de variables de interés en el modelo fisicoquímico** (Finizio, Mackay, Bidelmang, & Harner, 1997).

Tabla 16. Variables fisicoquímicas de interés para el modelo de comportamiento de PCB's del estudio (Finizio, Mackay, Bidelmang, & Harner, 1997).

Proceso	Variable de interés	Parámetros por evaluar
Partición gas-partícula	Coeficiente de partición gas-partícula Kp	(KoA) coeficiente de partición octanol-aire base volumen
		(M_{oM}) masa molecular media de la fase orgánica $\frac{g}{mol^{-1}}$,
		(γ_{oM}) coeficiente de actividad del químico en la fase orgánica
		(Pl^0) presión vapor líquido subenfriado
		(T) Temperatura

Fuente: Autor, 2018. Nota: tomado y modificado de (Finizio, Mackay, Bidelmang, & Harner, 1997).

Artículo científico “Regression Model of Partial Pressures of PCBs, PAHs, and Organochlorine Pesticides in the Great Lakes Atmosphere” (Venier & Hites, 2010)

- **Desarrolladores del modelo** (Venier & Hites, 2010)

Este estudio fue adelantado por Venier, M., en compañía de Hites, R., de la Escuela de Asuntos Públicos y Ambientales de la Universidad de Indiana.

- **Objetivo del estudio** (Venier & Hites, 2010)

El propósito de este estudio fue combinar parámetros ambientales en un modelo de regresión lineal múltiple para predecir la presión parcial atmosférica de contaminantes particulares, entre ellos (PCB's), con base en las variables de tiempo de muestreo, temperatura atmosférica, población, velocidad del viento y dirección del viento en sitio.

- **Ecuaciones asociadas al modelo fisicoquímico** (Venier & Hites, 2010)

Se indica que las presiones parciales atmosféricas en fase gaseosa de compuestos orgánicos semivolátiles dependen fuertemente de la temperatura atmosférica y que esta dependencia puede modelarse mediante la forma integrada de la ecuación de Clausius-Clapeyron [7].

$$\text{Log } P = -a_o \frac{\Delta H_{SA}}{RT} \quad [7]$$

Donde P es la presión parcial del analito (en atm), ΔH_{SA} es la energía necesaria para mover una mol de una sustancia desde una superficie ambiental (suelo, agua, vegetación, etc.) a fase gaseosa (en $\frac{kJ}{mol}$), T es la temperatura atmosférica en el sitio y momento de muestreo (en K), R es la constante de gases ideales $\frac{0.0083 \text{ kJ}}{K \times mol}$ y a_o es una intersección.

Aplicando esta expresión, se determinó la ecuación que describe las presiones parciales atmosféricas de PCB's totales en el sitio de estudio para el periodo comprendido entre 1992 y 2007, como una función de temperatura recíproca en la sesión de muestreo. Se corrigieron las presiones parciales a una temperatura de 288K, obteniendo la siguiente la ecuación [8].

$$\text{Log } P_{288} = \text{Log } P - a_1 \left(\frac{1}{288} - \frac{1}{T} \right) \quad [8]$$

Donde a_1 es $\frac{\Delta H_{SA}}{R}$ y P_{288} es la presión parcial corregida a 288 K, la gráfica P_{288} versus tiempo, permitió hallar la constante de primer orden b_1 , que es la pendiente de la regresión lineal de la ecuación [8] y representa la vida media del contaminante. Para esto se emplea la ecuación [9], donde t es el tiempo de la toma de muestras.

$$\text{Log } P_{288} = b_0 + b_1 t \quad [9]$$

Las concentraciones en fase gaseosa $\frac{pg}{m^3}$ de cada sustancia química se transformaron a presiones parciales (atm) utilizando la ley de los gases ideales y el promedio de temperaturas atmosféricas durante el período de muestreo de 24 horas medido en cada sitio. Los logaritmos de las presiones parciales atmosféricas luego se ajustaron utilizando Minitab 15, obteniendo la ecuación [10] con un coeficiente de correlación porcentual $R^2 = 80.82$ para PCB's.

$$\text{Log } P_{288} = d_0 + d_1 t + d_2 \left(\frac{1000}{T} \right) + d_3 \log^2(\text{pop}) + d_4 WS + d_5 \text{Cos}WD \quad [10]$$

Donde d_0 es una intersección, d_1 es una constante de velocidad de primer orden dias^{-1} , d_2 es la pendiente Clausius-Clapeyron en K, d_3 (sin unidades) describe el cambio de P como una función de la población (a sustituto de la actividad humana), y d_4 y d_5 describen la dependencia de la presión parcial en la velocidad del viento (en mph) y la dirección del viento, expresada como el coseno del ángulo (en radianes).

➤ **Conclusiones del modelo fisicoquímico** (Venier & Hites, 2010)

Usando este análisis unificado, es posible cuantificar la contribución de cada término (temperatura, población, velocidad y dirección del viento) en la correlación de la regresión general. Por ejemplo, para ΣPCB , el término de la población representa el 54.7% de la variabilidad total; la temperatura alcanza un 22.7%, y el tiempo, la velocidad del viento y la dirección del viento en conjunto representan solo un 3.27%. El general, la correlación R^2 es la suma de estos tres porcentajes, e indica que el 80.8% de la variabilidad de PCB's en la atmósfera se explica mediante el modelo fisicoquímico desarrollado.

El 19.2% restante de la variabilidad probablemente se deba al error experimental de medición. Las presiones parciales de ΣPCB y ΣPAH fueron fuertemente correlacionados con la población humana local; los coeficientes de este término representaron el 54.7% y el 73.9% del total de variabilidad respectivamente.

El porcentaje de correlación de la temperatura expresada como $1000 / T$, jugó un papel importante en la explicación de las presiones parciales de ΣPCB . Este hallazgo confirma el carácter estacional de la presión parcial atmosférica de PCB's, así como su fuerte relación con actividades humanas. Dada la vida media determinada para PCB's (12.6 ± 0.7 años) en la región del Gran Lago, es justo decir que los PCB's nos acompañarán en las próximas décadas.

➤ **Identificación de variables de interés en el modelo fisicoquímico** (Venier & Hites, 2010)

Tabla 17. Variables fisicoquímicas de interés para el modelo de comportamiento de PCB's del estudio (Venier & Hites, 2010)

Proceso	Variable	Parámetros por evaluar
Residencia atmosférica	Presión parcial P	(t) Tiempo de muestra
		(T) Temperatura
		(d_1) Constante de velocidad de primer orden
		(pop) población en un radio de 25km
		(WS) Velocidad del viento
		($CosWS$) Dirección del viento

Fuente: Autor, 2018. Nota: tomado y modificado de (Venier & Hites, 2010).

Artículo científico “Model of Long Term Exchange of PCB's between Soil and the Atmosphere in the Southern U.K” (Harner & Jones, 1995)

➤ **Desarrolladores del modelo** (Harner & Jones, 1995)

Este modelo de intercambio a largo plazo de PCB's entre la matriz suelo y atmósfera en el sur del Reino Unido, fue desarrollado por Harner, T., del departamento de Ingeniería Química Aplicada de la Universidad de Toronto y Jones, H., del Instituto de Ciencias Ambientales y Biológicas de la Universidad de Lancaster.

➤ **Objetivo del estudio** (Harner & Jones, 1995)

El objetivo del estudio comprendió la formulación de un modelo fisicoquímico para calcular concentraciones ambientales y fugacidades en el suelo y la atmósfera, así como la dirección y magnitud del flujo neto de PCB's entre dichas matrices durante el periodo comprendido entre los años 1935 y 2000 en el Reino Unido.

Se espera que el modelo sea acertado en el orden de magnitud, dada la variación de concentraciones, la heterogenicidad de los suelos, la meteorología y la incertidumbre tanto de las propiedades químicas, como los parámetros de transporte de la sustancia según la estacionalidad.

➤ **Ecuaciones asociadas al modelo fisicoquímico** (Harner & Jones, 1995)

Los flujos de PCB ($\frac{mol}{h}$), están dados por los valores de difusividad D ($\frac{mol}{hPa}$), que son multiplicados por la fugacidad (f, Pa) desde la fase fuente como se muestra en la ecuación [11].

$$\frac{df_S}{dt} = \frac{\{f_A(D_v + D_D + D_M + D_Q) - f_S(D_v + D_R + D_L)\}}{(V_S Z_S)} [11]$$

Donde $f_A D_v$ en el primer término representa la absorción del suelo, $f_A D_D$ es la deposición de partícula húmeda, $f_A D_M$ es la dilución por lluvia, $f_A D_Q$ es la deposición de partículas seca, $f_S D_v$ en el segundo término es la volatilización al aire, y $f_S D_R$ es la reacción en el suelo. El volumen total del suelo es V_S , y Z_S es la fugacidad en suelo.

En lugar tratar los datos en función de las concentraciones de PCB's en la atmósfera, se seleccionó una tasa de emisión de PCB's al aire E ($\frac{mol}{h}$), definida como una función en forma de campana dependiente del tiempo, la cual se muestra en la ecuación [12].

$$E_t = \{4E_{max} \frac{\exp\left[\frac{t_{max} - t}{A}\right]}{\left\{1 + \exp\left[\frac{t_{max} - t}{A}\right]\right\}^2}\} [12]$$

E_{max} es la tasa de emisión máxima es en un tiempo máximo t_{max} , y el parámetro A es el tiempo en años requerido para que la emisión máxima disminuya en un 80% de su valor inicial.

En la ecuación [13], la fugacidad química en aire (f_A) y la concentración de la sustancia en el aire está calculada en cualquier momento a partir del balance de masas en estado estable sobre la matriz atmósfera. E no es la tasa de emisión real, es la tasa necesaria para mantener una concentración deseada en el aire, asumiendo características de volumen y ventilación. E incluye el ingreso de PCB's al Reino Unido y supone una mezcla instantánea del contaminante a una altura de 2000 m.

$$f_A = \frac{E + f_s D_v}{D_v + D_{AD} + D_D + D_M + D_Q} [13]$$

Para facilitar la interpretación y la comparación de los resultados del modelo con los datos experimentales, las concentraciones fueron transformadas a fugacidades, permitiendo comparar directamente los niveles de PCB's en aire y suelo, con base al estado de equilibrio.

Se observa que los niveles de PCB's en el suelo no se aproximan al estado de equilibrio con el aire, sino que exceden en gran medida dicho valor, por lo que el suelo se encuentra siempre sobresaturado. Se puede reescribir la ecuación [11] en forma de estado estacionario, ignorando la reacción D_R y la lixiviación D_L en el suelo, como se muestra en la ecuación [14]. Entonces, la relación de suelo y fugacidad del aire es:

$$\frac{f_s}{f_A} = 1 + \frac{(D_D + D_M + D_Q)}{D_v} [14]$$

➤ **Conclusiones del modelo fisicoquímico** (Harner & Jones, 1995)

La fugacidad del suelo aparentemente excede a la del aire en un factor de al menos 10 y posiblemente 30 veces. Así, el suelo se sobresatura con respecto a la atmósfera. La implicación teórica es que los procesos de deposición húmeda y seca asociados a partículas tienen en valor total de $D_D + D_M + D_Q$, que excede la relación de la evaporación y absorción (D_v) por un factor de 10-30, por lo que existe un transporte no difusivo apreciable del aire al suelo, únicamente con retorno lento por evaporación.

El modelo simple de dos compartimientos proporciona una representación adecuada de la información, pero la estructura puede ser mejorada teniendo en cuenta la segmentación vertical del suelo y la atmósfera, así como la inclusión de la vegetación y la desorción lenta.

➤ **Identificación de variables de interés del modelo fisicoquímico** (Harner & Jones, 1995)

Las ecuaciones para deducir los valores de Z y D se muestran en la *Tabla 18*.

Tabla 18. Expresiones para calcular valores de Z y D

Valores de fugacidad Z ($\frac{mol}{m^3Pa}$)	Valores de difusividad D para suelo ($\frac{mol}{hPa}$)
Aire $Z_A = 1/RT^b$	Aire $D_A = AB_{AE}Z_A$
Agua $Z_W = 1/H^c$	Agua $D_W = AB_{WE}Z_W / Y_D$
Aire aparente $Z_{BA} = Z_A + (V_Q Z_Q)$	Interface $D_E = AK_V Z_A$
Materia orgánica $Z_{OM} = 0.56 K_{OC} Z_W = 0.56 Z_{OC}$	General $D_V = 1 / (\frac{1}{D_E} + \frac{1}{D_A + D_W})$
Materia inorgánica $Z_{MM} = K_{MW} Z_W$	
Suelo $Z_S = V_A Z_A + V_W Z_W + V_{OC} Z_{OC} + V_{MM} Z_{MM}$	

Fuente: Tomado y adaptado de (Harner & Jones, 1995)

Las ecuaciones para deducir el flujo de parámetros ambientales y la tasa de variación de la difusividad se reportan en la *Tabla 19*.

Tabla 19. Ecuaciones de flujo y tasa de valores de difusividad

Ecuaciones de flujo m^3/h	Tasa de Valores de difusividad D ($\frac{mol}{hPa}$)
Flujo de lluvia $G_C = A U_R$	Disolución por lluvia $G_C Z_Q f_A$
Flujo de depósito seco $G_Q = A U_P V_Q$	Depósito de partícula seca $D_Q = G_Q Z_Q f_A$
Flujo de depósito húmedo $G_D = G_C Q_R V_Q$	Depósito de partícula húmeda $D_D = G_D Z_Q f_A$
Flujo de aire $G_A = Wh V_A$	Advección en aire $D_{AD} = G_A Z_{BA} f_A$
Flujo de drenaje $G_L = AL_W$	Drenaje en suelo $D_L = G_L Z_W f_S$
	Absorción en suelo $D_V = D_V f_A$
	Volatilización al aire $D_V = D_V f_S$

Fuente: Tomado y adaptado de (Harner & Jones, 1995)

Los parámetros ambientales seleccionados y medidos para el estudio se muestran en la *Tabla 20*.

Tabla 20. Valores seleccionados para diferentes parámetros ambientales

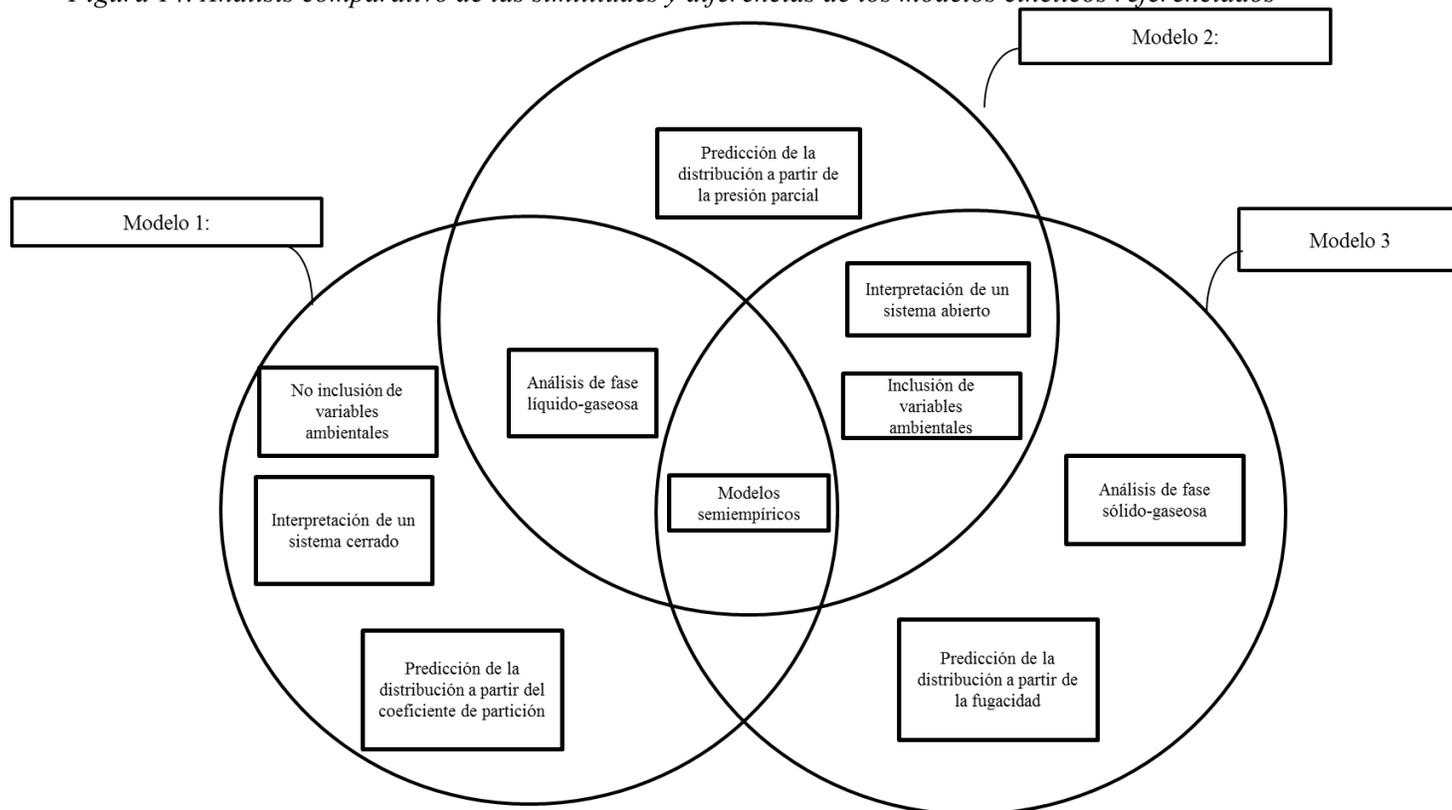
Parámetro ambiental	Valor	Parámetro ambiental	Valor
Área del sur del UK A	$1,2 \times 10^{11} m^2$	Volumen de la fracción agua en suelo V_W	0,2
Ancho de la atmósfera W	350.000m	Volumen de la fracción carbono orgánico en suelo V_{OC}	0,01
Altura de la atmósfera h	2.000m	Volumen de la fracción inorgánica en suelo V_{MM}	0,39
Longitud de la atmósfera L	350.000m	Coefficiente de partición fase inorgánica-agua K_{MW}	1
Tasa de lluvia U_R	$8 \times 10^{-5} m/h$	Distancia de difusión en suelo Y_D	0,01m
Velocidad de depósito seco U_P	15 m/h	Difusividad efectiva en aire B_{AE}	$2,34 \times 10^{-3} \frac{m^2}{h}$
Volumen de la fracción aerosol en atmósfera V_Q	6×10^{-11}	Difusividad efectiva en agua B_{WE}	$2,33 \times 10^{-8} \frac{m^2}{h}$
Volumen de la fracción aire en suelo V_A	0,4	Coefficiente de transferencia de masa de la capa interface aire K_v	3,77m/h

Fuente: Tomado y adaptado de (Harner & Jones, 1995)

7.4.2.2.2 Análisis comparativo de los modelos fisicoquímicos de PCB's.

En este apartado se presenta el análisis de los tres modelos que describen el comportamiento de los bifenilos policlorados PCB's. En primer lugar, se presenta una comparación general de los modelos en la *Figura 14*.

Figura 14. Análisis comparativo de las similitudes y diferencias de los modelos cinéticos referenciados



Fuente: Autor, 2018.

El primer modelo fisicoquímico Finizio, Mackay, Bidelmang, & Harner, (1997), realiza una descripción del comportamiento de compuestos orgánicos semivolátiles como los PAH's y compuestos clorados como los PCB's y pesticidas en un sistema en equilibrio (partícula-aire), a partir de una variable fisicoquímica, como lo es el coeficiente de partición o reparto partícula-aire (K_p).

Este modelo es útil en la medida que, mediante una única variable, representa el fenómeno de distribución de la concentración del contaminante en dos fases de interés. Gracias a este modelo se concluye que el coeficiente de partición octanol-aire es un excelente descriptor del comportamiento de estos compuestos.

Además, el análisis del modelo se realiza desde una perspectiva semi empírica, lo cual permite correlacionar datos medidos en diferentes lugares y momentos de estudio, validando el resultado generado a partir de una ecuación específica para el modelamiento de PCB's con un coeficiente de

correlación de 0,79, lo cual representa una ventaja en el análisis del comportamiento de la sustancia de interés (PCB's).

Pese a lo anterior, la limitante de estas aproximaciones para el establecimiento del modelo fisicoquímico propuesto en este estudio es la comprensión del comportamiento de los bifenilos policlorados en un sistema cerrado, si bien esta condición simplifica la evaluación de variables, puede limitar la aplicación del modelo en sistemas expuestos a condiciones ambientales reales. Por otra parte, si bien el coeficiente de reparto permite deducir la concentración del contaminante de interés en la matriz atmósfera, el modelo Finizio, Mackay, Bidelmang, & Harner, (1997) no representa la distribución espacial de esta concentración en el ambiente.

El segundo modelo cinético Venier & Hites, (2010), también corresponde a un modelo semi empírico, aplicado a la zona del Gran Lago en Estados Unidos, sin embargo, a diferencia del primer modelo, el sistema estudiado se considera abierto, incluyendo en la predicción de la presión parcial del contaminante, variables ambientales como la temperatura atmosférica, la dirección y velocidad del viento, la población, y el momento de la muestra.

Al realizar regresiones de estas variables por separado con resultados no tan positivos, esta herramienta por sí sola no logró concluir cuál de los tres parámetros genera mayor influencia en la presión parcial medida. Para superar esta limitante, se combinaron estos parámetros en un modelo de regresión lineal múltiple para predecir la presión parcial atmosférica de PCB's, basado en el tiempo de muestreo, temperatura atmosférica, población local, velocidad del viento y dirección del viento en el sitio de muestreo.

Este modelo realiza una descripción bastante cercana al fenómeno, partiendo de la presión parcial del sistema, en lugar del coeficiente de partición, lo que permite abordar la volatilidad, la distribución del contaminante, y su vida media, esto gracias a que la presión parcial es la medida de la actividad termodinámica de las moléculas de un gas, proporcional a la temperatura y concentración de este (Laldler & Melsor, 2000). Por esta razón, el modelo Venier & Hites, (2010), se adapta de manera más cercana a las necesidades de estimación del modelo fisicoquímico a establecer en este estudio.

Otro factor destacable en el modelo mencionado, es que dentro de la ecuación matemática planteada, las constantes calculadas tienen significancia desde la perspectiva fisicoquímica, por ejemplo, d_1 es una constante de velocidad de primer orden, d_2 es la pendiente Clausius-Clapeyron, d_3 describe el cambio de P como una función de la población y d_4 y d_5 describen la dependencia de la presión parcial en la velocidad del viento y la dirección del viento.

El último modelo semi empírico analizado Harner & Jones, (1995), describe un sistema abierto desde el intercambio entre los compartimientos suelo y atmósfera a largo plazo, partiendo ahora de los valores de la fugacidad del contaminante en el aire y en el suelo. Así, este modelo describe el comportamiento de cuatro congéneres de PCB's a partir de las fugacidades, en lugar de la presión parcial o el coeficiente de reparto, esta variable guarda una relación con la presión parcial, según Laldler & Meiser, (2000), ya que, si el gas se comporta idealmente y cumple con la Ley de Raoult, la presión parcial será igual a la fugacidad, siguiendo la siguiente ecuación.

$$a_i = \frac{f_i}{f_i^0} = \frac{P_i}{P_i^*} [15]$$

Donde a_i es la actividad relativa, f_i^0 es la fugacidad en el estado estándar y es 1 bar, y P_i^* es un estado de referencia para el componente i .

La actividad relativa del componente en solución es la relación entre la presión parcial del componente i por encima de su solución, en comparación con la presión de vapor del componente puro i a la temperatura del sistema, mientras la fugacidad está relacionada con el potencial químico. La fugacidad conserva unidades de una "presión corregida" y está directamente relacionada con la tendencia de una sustancia de preferir una fase frente a otra (Laidler & Meiser, 2013).

Una limitante del cálculo de la fugacidad radica en que es posible que el valor de Z de PCB en el suelo esté subestimado, ya que la ecuación supone que todo el contenido de PCB está disponible. Por ejemplo, si una fracción del PCB es extraíble en hexano, pero no está disponible para la evaporación o lixiviación, Z será subestimado y la fugacidad del suelo se sobreestimarán (Harner & Jones, 1995). Por otra parte, los autores también exponen que el modelo puede presentar porcentajes de error, dada la subestimación de la tasa de reducción de PCB's en los años recientes.

Otro factor limitante del modelo puede ser el tratamiento de los suelos como un solo compartimento bien mezclado, es probable que el suelo superficial intercambie PCB rápidamente con la atmósfera en el primer centímetro, alcanzando fugacidades iguales entre las matrices, mientras los suelos más profundos son más resistentes a la evaporación y los PCB's que logran filtrarse en el suelo, podrán quedar retenidos con una alta fugacidad (Harner & Jones, 1995).

Sin embargo, cabe resaltar que este modelo en cuestión toma en consideración aún más variables ambientales que el modelo Venier & Hites, (2010), integrando la advección del viento, la escorrentía, la reacción de PCB's en el suelo, y la deposición húmeda y seca de partículas. Así, a pesar de que el modelo Harner & Jones, (1995) describe de manera fiel el sistema, teniendo en cuenta las diferentes interacciones entre matrices y las condiciones ambientales reales a las que se expone este contaminante, representado por las dinámicas de flujo y la difusividad de los PCB's, esta cualidad hace que sea complejo de modelar y adaptar al modelo fisicoquímico a establecer en este estudio.

7.4.2.2.3 Selección de variables de interés para el diseño del modelo de comportamiento fisicoquímico del Aroclor 1260 (PCB).

La estimación de la distribución del contaminante de interés se desarrolla en función de la presión parcial, en conformidad con el segundo modelo analizado Venier & Hites, (2010). La selección de esta variable se reafirma mediante el concepto del Instituto Hydro-Quebec Research, (1988), según el cual, la variable clave para modelar el transporte de PCB's desde los sitios de derrame es la presión de vapor, si la estimación se dirige al transporte de PCB's la atmósfera. La presión de vapor del PCB y la presión parcial del sistema evaluado (PCB en aceite dieléctrico), están relacionadas mediante la Ley de Roul, partiendo de la concentración de PCB en este fluido, como se describirá más adelante.

Por otra parte, se define que el modelo no evalúa el intercambio desde la matriz suelo a la atmósfera, en lugar de esto, se evalúa el derrame o fuga de aceite dieléctrico expuesto al medio ambiente de manera indefinida desde una fase líquida (aceite) hacia la atmósfera. Esta aproximación se concluye teniendo en cuenta que se desea realizar una aproximación del comportamiento de PCB Aroclor 1260 en un derrame o fuga sobre suelo asfaltado, sobre el cual no se considera la absorción y la filtración del aceite

contaminado, ya que dichos procesos no son apreciables (Totten, Stenchikov, Gigliotti, Lahoti, & Eisenreich, 2006).

Una vez aclarado el contexto del sistema, se resalta que, tanto para las evaluaciones de riesgo como para las evaluaciones de exposición retroactiva, es importante incluir información atmosférica disponible para cuantificar el área de "potencial" de exposición (Hydro-Quebec Research Institute, 1988). Es por esto que la perspectiva de análisis se realiza considerando un sistema abierto, como en el segundo y tercer modelo fisicoquímico. Teniendo en cuenta lo anterior, se seleccionaron variables ambientales descritas en el modelo Venier & Hites, (2010), definidas este diseño como temperatura (T), la dirección del viento (\vec{V}) y la velocidad del viento (v).

Otros parámetros adaptados del modelo Venier & Hites (2010), son el uso de una intersección (d_o), redefinido en el modelo de este estudio como (k), empleada para el ajuste de la ecuación matemática, el parámetro d_3 , redefinido en este estudio como (b), que describe la dependencia de la presión parcial con la velocidad del viento y la pendiente de Clausius Claperyon (d_2), redefinida como (a). La variable población no fue incluida en el modelo fisicoquímico de PCB, dada la disponibilidad de esta información en una resolución de 25 kilómetros a la redonda de cada transformador eléctrico.

Otro parámetro que no pudo ser determinado para ser incluido en el modelo fisicoquímico establecido fue la constante de velocidad de reacción de PCB, expresada como d_1 por Venier & Hites (2010). Después de una revisión exhaustiva se concluyó que esta constante no ha sido descrita para el Aroclor 1260, por lo que sería importante calcularla experimentalmente con el objetivo de conocer la velocidad de reacción de este compuesto en el ambiente y poder determinar la concentración del contaminante en una distancia determinada.

Las variables ambientales del modelo Harner & Jones, (1995), describen fielmente el comportamiento del contaminante de interés en el ambiente, sin embargo, no es posible dar alcance a la definición de todas las variables descritas para el Aroclor 1260, en cierta medida, debido a que no está contemplado dentro del alcance de la metodología de evaluación del riesgo, el muestreo ambiental del contaminante en las diferentes matrices para la determinación de los flujos de PCB's.

Pese a lo anterior, el modelo planteado por Harner & Jones, (1995) permite la interpretación del sistema lo suficientemente detallada para brindar una guía para la conceptualización del sistema específico a evaluar. Otro aporte de este modelo al diseño del modelo fisicoquímico para el Aroclor 1260, son los valores de difusividad efectiva en aire $B_{AE} 2,34 \times 10^{-3} \frac{m^2}{h}$ y agua $B_{wE} 2,33 \times 10^{-8} \frac{m^2}{h}$, cuya sumatoria define el valor de difusividad D en el diseño del modelo propuesto, este valor permitirían describir la distribución del PCB por unidad de área en una dirección específica, conforme a la primera Ley de Fick (Laidler & Meiser, 2013).

La difusividad D está asociada con el parámetro d_4 del modelo Venier & Hites (2010), descrita como la dependencia de la presión parcial con relación a la dirección del viento, esta asociación es abordada a través de la Ley de Fick [16], la cual establece que la rapidez de difusión por unidad de área de sección transversal en una dirección determinada es proporcional al cambio de la concentración del soluto en esa dirección (Laidler & Meiser, 2013).

$$\frac{\Delta m}{\Delta t} = -DA \frac{\Delta C}{\Delta x} [16]$$

Donde $\frac{\Delta m}{\Delta t}$ es la masa del soluto que difunde a lo largo de esa dirección por unidad de tiempo, A es el área de la sección transversal, C es la concentración del soluto, D es el coeficiente de difusión, y $\frac{\Delta C}{\Delta x}$ es el gradiente de concentración.

La dirección descrita en la ecuación [16] se entendería como la dirección del viento definida en el modelo de Venier & Hites (2010). Por otra parte, mediante la Ley de Raoult [17], la concentración del soluto (PCB), puede ser expresada como presión parcial, variable definida también en dicho modelo. Lo anterior demuestra la equivalencia del parámetro d_4 con la difusividad D .

$$P_i = X_i P_i^o \quad [17]$$

Donde P_i es la presión parcial del PCB, X_i es la fracción molar del Aroclor 1260 obtenida a partir de su concentración en el aceite dieléctrico del transformador, y P_i^o es la presión de vapor del Aroclor 1260 puro. La deducción de la presión parcial del PCB Aroclor 1260 se muestra en el siguiente apartado.

Después del análisis de los modelos citados, se aborda el diseño del modelo fisicoquímico desde un enfoque semi empírico, con datos cuantificados de la concentración del contaminante PCB en aceite dieléctrico en el año 2016, a partir de cromatografía de gases realizada en laboratorios acreditados por el IDEAM, y la interpolación de la temperatura, velocidad del viento y dirección del viento, obtenida a partir de los datos meteorológicos de las estaciones de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá RMCAB (2008-2016) y las herramientas de análisis espacial del software ArcGis versión 10.4.

Teniendo en cuenta los procesos descritos en los modelos consultados, las variables seleccionadas para la evaluación del comportamiento de PCB's se muestran en la *Tabla 21*. La comprensión del modelo y de cada una de las variables se describe en el siguiente apartado.

Tabla 21. Variables seleccionadas para el diseño modelo de comportamiento fisicoquímico del Aroclor 1260 (PCB).

Proceso	Variable	Parámetros por evaluar
Intercambio de contaminante entre fase líquida y atmósfera	Presión parcial (P_i)	Concentración de PCB en aceite dieléctrico (C)
		Fracción molar de PCB (X)
		Presión de vapor de PCB (P^o)
Distribución del contaminante	Logaritmo Natural de la presión Parcial ($Ln(P)$)	Temperatura (T)
		Velocidad del viento (v)
		Dirección del viento (\vec{V})
		Pendiente de Clausius Claperyon (a)
		Dependencia de la presión parcial en la velocidad del viento (b)
		Dependencia de la presión parcial en la dirección del viento= Difusividad (D)

Fuente: Autor, 2018.

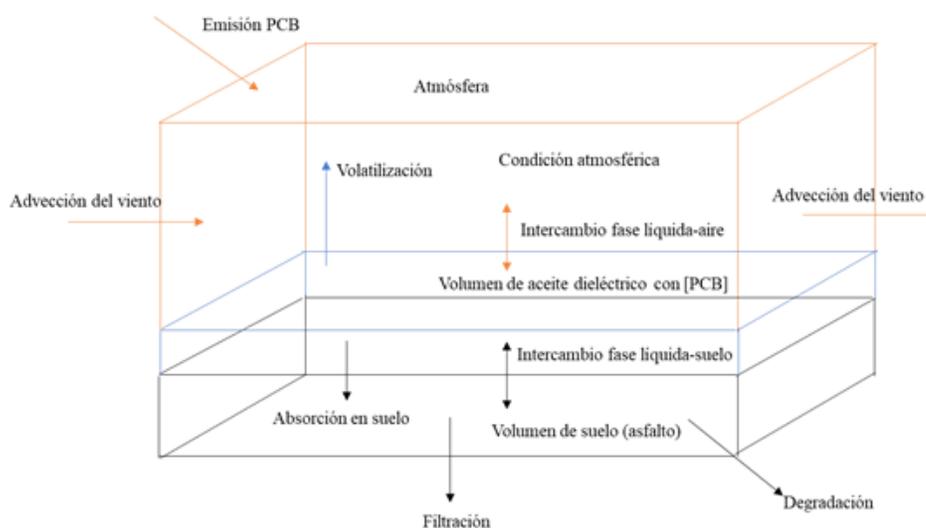
7.4.3 Formulación del modelo preliminar de comportamiento fisicoquímico del Aroclor 1260 (PCB).

Teniendo en cuenta que los escenarios de riesgo asociados a la exposición de PCB's en el ambiente son el derrame o fuga de aceite dieléctrico con cierta concentración de PCB's, se asumen que estos escenarios son la fuente de emisión del contaminante para plantear el modelo general de intercambio del contaminante en los compartimientos o matrices ambientales implicadas en la *Figura 15*.

Cuando sucede una fuga o derrame de aceite dieléctrico, ya sea por una mala práctica de mantenimiento o por un estado desfavorable del transformador, el volumen de aceite con posible concentración de PCB que escapa del equipo se deposita sobre el suelo. En el perímetro urbano de Bogotá el suelo que entra en contacto con el aceite típicamente es una superficie asfaltada (HSE, 2018)

Las condiciones ambientales y las propiedades fisicoquímicas de la sustancia de interés pueden favorecer la volatilización de PCB's contenidos en el aceite hacia la atmósfera, generando el intercambio del contaminante desde la fase líquida (aceite dieléctrico) al aire. Dada la variación de velocidad del viento en el campo vectorial del sistema, entendido como advección del viento y otras variables ambientales (Harner & Jones, 1995), los bifenilos policlorados pueden distribuirse en la atmósfera y llegar a ser inhalados, no solo por la población del perímetro urbano, sino fuera de los límites del área de estudio, dada las propiedades de estabilidad química y persistencia de los PCB's (Totten, Stenchikov, Gigliotti, Lahoti, & Eisenreich, 2006).

Figura 15. Modelo general de intercambio de PCB's en las matrices ambientales suelo y atmósfera

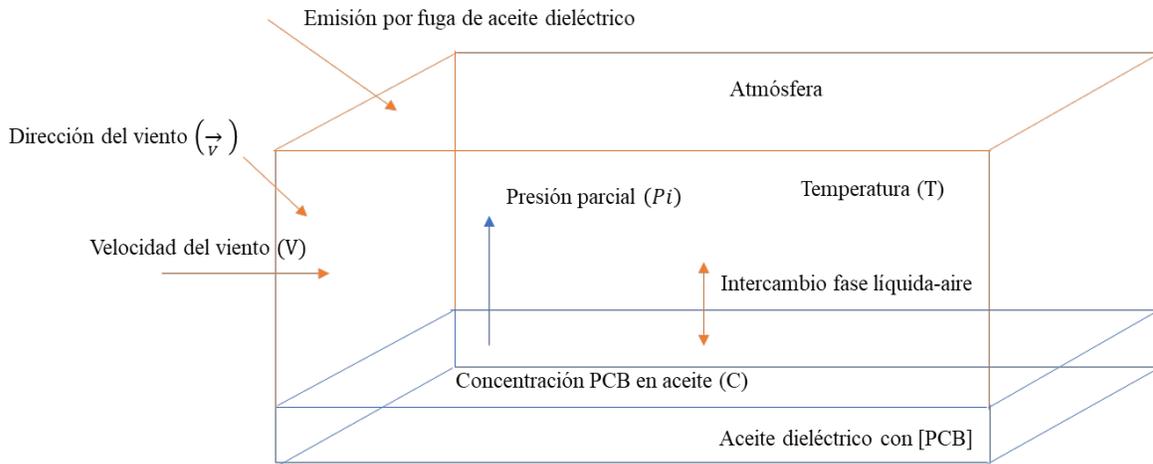


Fuente: Autor, 2018

El modelo de la *Figura 13* representa la complejidad del intercambio de PCB's en las matrices ambientales, sin embargo, en el modelamiento del comportamiento fisicoquímico del contaminante, diseñado para esta metodología de evaluación, no se considera la absorción y filtración de PCB's en el suelo, ya que estos fenómenos son mínimos en asfalto (Totten, Stenchikov, Gigliotti, Lahoti, & Eisenreich, 2006). Así mismo, la degradación de bifenilos policlorados no será objeto de estudio, teniendo en cuenta la vida media del contaminante y su persistencia (Venier & Hites, 2010).

Teniendo en cuenta esta situación, el sistema objeto de modelamiento para la estimación de la distribución del Aroclor 1260 en el ambiente, contempla únicamente el intercambio entre la fase líquida (aceite dieléctrico contaminado) y la atmósfera. Las variables seleccionadas para el diseño del modelo de comportamiento fisicoquímico del Aroclor 1260 se muestran en la *Figura 16*, y se relacionan con las definidas en la *Tabla 18*.

Figura 16. Sistema específico para el modelamiento fisicoquímico del Aroclor 1260 en la matriz atmósfera, producto de una fuga o derrame de aceite dieléctrico con contenido de PCB's en suelo asfaltado



Fuente: Autor, 2018

Para comprender el modelo, cabe recordar que el volumen de aceite dieléctrico producto de una fuga o derrame contiene una concentración de PCB's (C) definida por el análisis cromatográfico del aceite dieléctrico asociado a cada uno de los transformadores eléctricos reportados en el inventario de equipos de Codensa S.A.S E.S.P ante el IDEAM.

El contaminante, dado su potencial químico, presentará una tendencia a preferir una fase (líquida o gas), que depende de la presión parcial (P_i) de la sustancia (Aroclor 1260) en un sistema en equilibrio influenciado por la temperatura (Laidler & Meiser, 2013). La variable presión representa la volatilidad definida en el modelo de la *Figura 14*.

Por otra parte, la advección del viento es descrita por las variables velocidad del viento (v) y dirección del viento (\vec{V}), variables que demostraron tener una correlación con la presión parcial del contaminante, al igual que la temperatura (T) (Venier & Hites, 2010). Finalmente, el diferencial de concentración del Aroclor 1260, determinado en dirección del viento (\vec{V}), se define mediante el coeficiente de difusividad (D) (Harner & Jones, 1995).

Teniendo en cuenta todos los análisis previos y guardando la relación con el modelo Venier & Hites, (2010), la ecuación preliminar planteada para la descripción del modelo fisicoquímico de comportamiento del Aroclor 1260 se muestra en la ecuación [18].

$$\ln(P) = a \left(\frac{1000}{T} \right) + \frac{b}{v} + \frac{D}{(V)} + j \quad [18]$$

Donde $\ln(P)$ es el logaritmo de la presión parcial del Aroclor 1260 en atmósferas (atm), T es la temperatura ambiental en la zona del derrame en Kelvin (K), v es la velocidad del viento en la zona del derrame en metros por hora (m/h) y $\overline{(\vec{V})}$ es la dirección del viento en la zona del derrame en radianes.

La constante a hace referencia a la pendiente de Clausius Claperyon y b representa la dependencia de la presión parcial con relación a la velocidad del viento y j es un intercepto.

D fue definido como la sumatoria de la difusividad efectiva en el aire B_{AE} y el agua B_{wE} [19] (Harner & Jones, 1995).

$$D = B_{AE} + B_{wE} \quad [19]$$

$$D = 2,34x 10^{-3} \frac{m^2}{h} + 2,33x 10^{-8} \frac{m^2}{h}$$

$$D = 2,34x 10^{-3} \frac{m^2}{h}$$

Por lo tanto, la ecuación preliminar que describiría el comportamiento fisicoquímico del Aroclor 1260 se expresa en la ecuación [20]. En las siguientes secciones se muestra el cálculo de las variables del modelo.

$$\ln(P) = a \left(\frac{1000}{T} \right) + \frac{b}{v} + \frac{2,34x 10^{-3} m^2/h}{(\vec{V})} + j \quad [20]$$

7.4.3.1 Cálculo de la presión parcial del Aroclor 1260 $\ln(P)$

La variable $\ln(P)$ del modelo fue calculada en una base de datos realizada en la herramienta Microsoft Excel versión 365, como se muestra en el *Anexo 2.*, con 10381 registros asociados a la concentración de PCB's de cada uno de los transformadores de distribución objeto de estudio.

La presión parcial (P) de PCB's, específicamente de la mezcla comercial Aroclor 1260, fue determinada a partir de la Ley de Raoult, evidenciada en la ecuación [17], entendiendo un sistema en equilibrio líquido vapor, siguiendo la idealidad de este fundamento teórico (Laidler & Meiser, 2013)

$$P_i = X_i P_i^0 \quad [17]$$

Donde P_i es la presión parcial del PCB (Aroclor 1260) en la solución de aceite dieléctrico en atmósferas (atm), X_i es la fracción molar de PCB (Aroclor 1260) en la solución (sin unidades), y P_i^0 es la presión de vapor del PCB (Aroclor 1260) puro en atmósferas (atm). Para calcular P_i , en primer lugar,

se debe calcular la fracción molar del Aroclor 1260 en la solución, como se muestra en la ecuación [21].

$$X_i = \frac{molAroclor1260}{molAroclor + molAceite} \quad [21]$$

Los moles de Aroclor 1260 se calculan en un litro de aceite dieléctrico, a partir de la concentración analizada en aceite dieléctrico (C) reportada en partes por millón (ppm), equivalente a mg/L. Empleando la masa molecular del Aroclor 1260 (378 g/mol) (ASTDR, 2000), se calculan los moles de la sustancia mediante la ecuación [22].

$$molAroclor1260 = C \left(\frac{mg}{L} \right) \times \frac{1g}{1000mg} \times \frac{378mol (Aroclor 1260)}{g(Aroclor 1260)} \quad [22]$$

Una vez calculados los moles del Aroclor 1260, se procede a calcular los moles de aceite dieléctrico en un volumen de 1 litro, a partir de la densidad reportada en las especificaciones técnicas del aceite dieléctrico a nivel mundial (0.895g/mL) (UNCOR, 2010) (EDP HC ENERGÍA, 2018) (REPSOL, 2015), y un promedio de la masa molecular del aceite mineral parafínico, correspondiente a 352.5g/mol (INECC, 2017), como se muestra en la ecuación [23].

$$mol Aceite dieléctrico = L aceite \times \frac{100ml}{L} \times \frac{0,895g}{mol} \times \frac{1mol Aceite dieléctrico}{395g Aceite dieléctrico} \quad [23]$$

Los valores obtenidos de la ecuación [20] y [21] se reemplazan en la ecuación [19], para calcular la fracción molar del Aroclor 1260. Habiendo calculado este dato, se calcula la presión parcial del Aroclor 1260 en la solución de aceite dieléctrico en atmósferas (atm), reemplazando los valores de fracción molar X_i y la presión de vapor del Aroclor 1260, correspondiente a 4.05×10^{-5} mmHg (NCBI, 1992), expresadas en atmósferas en la ecuación [24].

$$P_i(atm) = X_i \times 4.05 \times 10^{-5} \times \frac{1atm}{760mmHg} \quad [24]$$

La presión parcial podría ser expresada en pascuales (Pa) empleando la ecuación [25]

$$P_i(Pa) = P_i(atm) \times \frac{101325 Pa}{1atm} \quad [25]$$

7.4.3.2 Cálculo geoestadístico de las variables ambientales del modelo

El cálculo de la variable temperatura (T), fue el resultado de la interpolación de los valores promedios anuales de este parámetro durante el periodo 2008-2016. Estos datos están disponibles en el Informe Anual 2016 de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB, 2016).

Se realizó un promedio de las temperaturas registradas (2008-2016) para cada una de las diez (10) estaciones de monitoreo que reportaron más del 80% de la información anual de temperatura, obteniendo valores promedio entre 13,3 y 15,3 °C en el perímetro urbano de Bogotá. Las coordenadas x e y de las estaciones se convierten en un dato espacial, usando el sistema de referencia Magna Colombia Bogotá, ya que este es el sistema de referencia usado por la RMCAB.

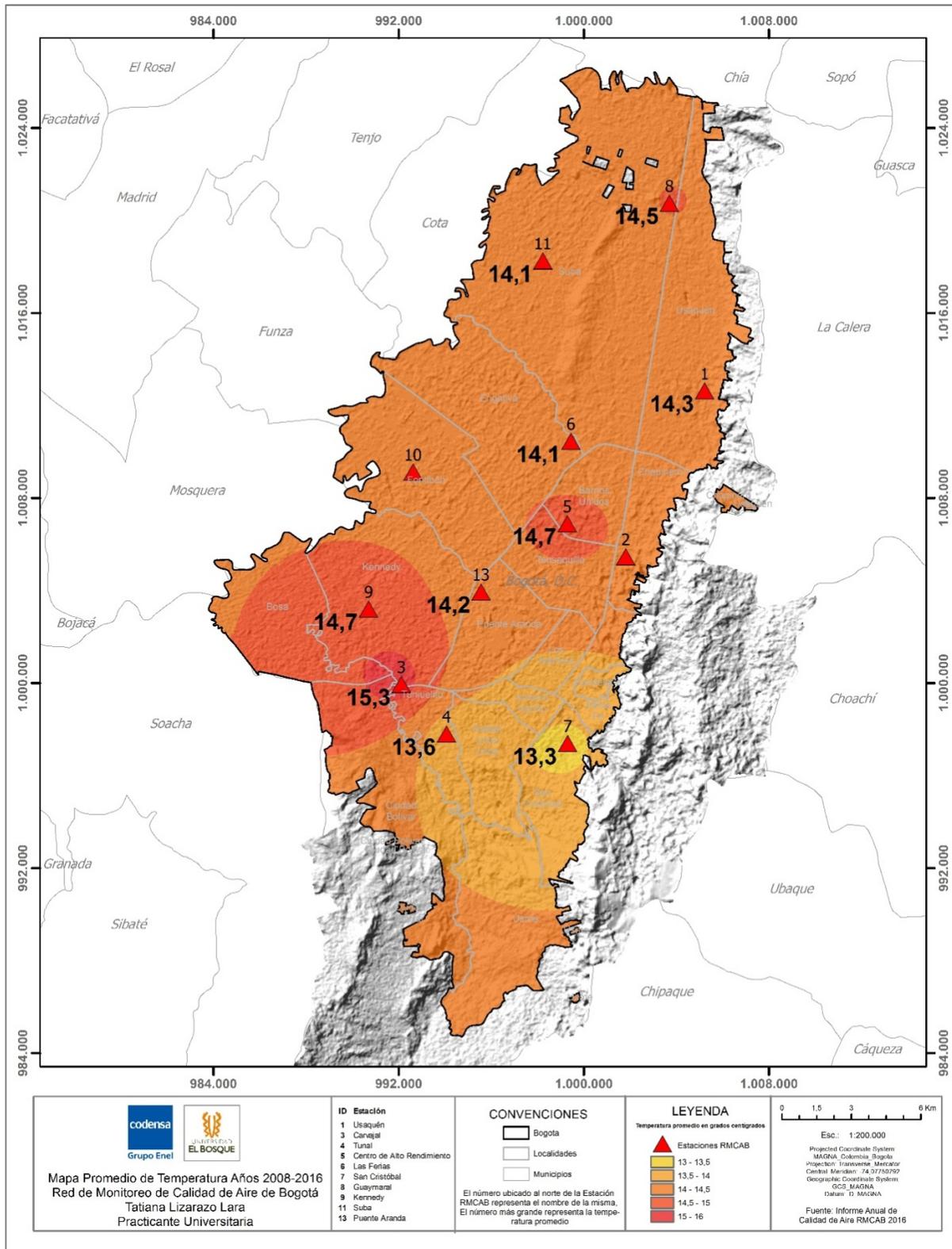
Para obtener los datos de temperatura promedio en todo el territorio comprendido en el perímetro urbano de Bogotá, se realizó la interpolación del dato geoespacial de temperatura en el software de información geográfica ArcGis versión 10.4, usando la herramienta *Geostatistical Analyst*, seleccionando el asistente *Geoestadistical Wizard*.

Una vez en el asistente, se aplicó el método geoestadístico de interpolación *Simple Kriging*, que incluye el error y la aleatoriedad en su cálculo, y además produce una superficie de predicción con una medida considerable de certeza o exactitud (Arcgis for Desktop, 2017).

Para la configuración de la matriz de varianzas y covarianzas de las interpolaciones se seleccionó el modelo matemático *Exponential*, este modelo predice satisfactoriamente el comportamiento de los datos, disminuyendo el error medio cuadrático de la predicción (Arcgis for Desktop, 2017). Finalmente, se seleccionó el parámetro de semivariograma *Nugget* con un valor igual a cero (*false*), asumiendo que las mediciones registradas por las estaciones de la Red de Monitoreo de Calidad de Aire de Bogotá presentan una incertidumbre de medición despreciable.

La capa de interpolación de temperatura fue exportada como *Raster* y geoprocesada mediante la herramienta *Spatial Analyst*, seleccionando la opción *Extraction-Extract by mask*, con el objetivo de aplicar una máscara, configuración que permite que el procesamiento de la información sólo ocurra en las ubicaciones que corresponden a la máscara, en este caso el perímetro de Bogotá, todas las ubicaciones fuera de ella se asignan a *NoData* en la salida (ArcGis for Desktop, 2016). Esto permitió ampliar la cobertura de la interpolación de temperatura a todo el perímetro urbano de Bogotá, obteniendo un dato de temperatura para cada punto geográfico donde estén ubicados los transformadores de distribución, en los cuales se puede materializar la situación de riesgo. El mapa de distribución de temperatura promedio para el periodo 2008-2016 se evidencia en la *Figura 17*.

Figura 17. Mapa de interpolación de temperatura promedio en el perímetro urbano de Bogotá (2008-2016)



Fuente: Autor, 2018.

Para atribuir un valor de temperatura a cada transformador (entendiendo la ubicación del transformador como la zona potencial de derrame o fuga de aceite dieléctrico), se generó una tabla de atributos para la capa de transformadores, empleando la herramienta *Spatial Analyst* seleccionando la opción *Zonal statistics as table* (ArcGis for Desktop, 2016).

Una vez generada la tabla de transformadores se adicionó una fila para calcular el atributo temperatura (T). En primer lugar, se empleó la función *Joins and relates* para asociar los registros de la tabla de temperatura a la tabla de transformadores a través de un campo común (*key*) (Arcgis for Desktop, 2017), en este caso, un identificador único creado. Posteriormente, se calculó el campo creado para temperatura, asignando los valores de la asociación al campo vacío, una vez calculado el campo se eliminó la unión.

El procedimiento completo de interpolación de temperatura fue realizado de manera homóloga para la variable velocidad del viento v , y dirección del viento \overline{V} . Sin embargo, se realizaron algunas modificaciones. Para estas variables se empleó la información de doce (12) estaciones de la red de monitoreo, reportada en el Informe Anual 2016 de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB, 2016).

Antes de iniciar el procedimiento de interpolación, se realizó un análisis descriptivo de los datos en ArcGis versión 10.4 para identificar tendencias y variaciones, este análisis reflejó que los valores promedios registrados de dirección del viento no presentan media constante en el espacio.

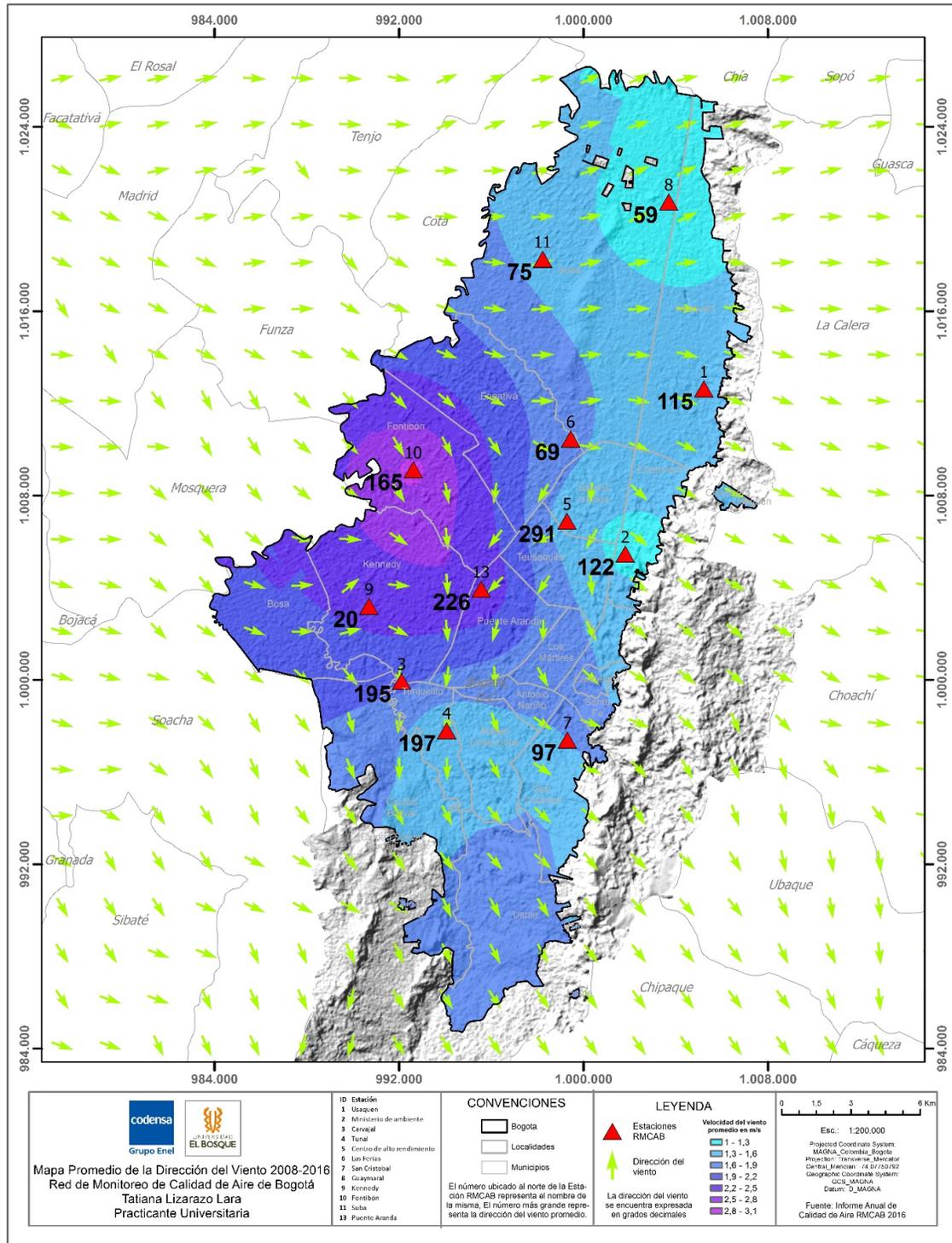
Por esa razón, esta vez se seleccionó el método geoestadístico de interpolación *Kriging/cokring* en la opción *Ordinary kriging*, este cambio se debe a que la varianza y la media de los datos no es uniforme en la distribución del espacio de interpolación (ArGis for Desktop, 2018). Se mantuvo el modelo matemático *Exponential* y el parámetro *Nugget* con valor de cero (*false*).

Para generar la visualización de los vectores en el mapa, se desactivó la máscara creada anteriormente, luego se ubicó la capa de dirección del viento “kriging” para seleccionar la opción *Extend- Current display extend*, esto produce que interpolación de la información de dirección del viento abarque no sólo el perímetro urbano de Bogotá, sino toda el área de visualización del mapa. Cuando se extiende la capa interpolada a la extensión total del mapa, se exporta la capa utilizando la opción *Export to raster*.

Finalmente, en las propiedades la capa raster, en la opción *Symbology*, se define mostrar la capa como campo vectorial con la configuración de representatividad del símbolo de 2500 metros. El mapa de distribución de la velocidad y dirección del viento se observa en la *Figura 18*. La velocidad del viento tomó valores entre 1 y 2,9 m/s en perímetro urbano de Bogotá, y la dirección del viento se muestra como una distribución de vectores.

Para atribuir un valor de velocidad y dirección del viento a cada transformador (entendiendo la ubicación del transformador como la zona potencial de derrame o fuga de aceite dieléctrico), se generó una tabla de atributos para la capa de transformadores, empleando la herramienta *Spatial Analyst*, como se explicó anteriormente. De esta forma se obtuvo una tabla con los registros de las variables ambientales para la totalidad de la muestra de transformadores de distribución objeto de evaluación en el perímetro urbano de Bogotá.

Figura 18. Mapa de interpolación de velocidad y dirección del viento promedio en el perímetro urbano de Bogotá (2008-2016)



Fuente: Autor, 2018.

A partir de los mapas de distribución de las variables ambientales de estudio y con base a los rangos generados por la interpolación, se puede decir que la zonas más cálidas del perímetro urbano de Bogotá, dentro de lo cabe decir en un rango de variación de temperatura tan reducido, corresponde a las localidades de Bosa y Kennedy al suroccidente, parte de Tunjuelito y Ciudad Bolívar al sur, y la zona de transición entre Barrios Unidos y Teusaquillo en el centro de la ciudad; alcanzando temperaturas de hasta 16°C.

Algunas de estas zonas coinciden a su vez con las zonas que presentan valores de velocidad promedio más altas (hasta 3,1 m/s) al suroccidente de la ciudad, donde se encuentran las localidades de Kennedy y Fontibón extendiéndose a las localidades de Bosa y Puente Aranda, así como también a la localidad de Engativá al noroccidente de Bogotá.

Las zonas con valores de velocidad del viento más reducidas (de 1 a 1,3 m/s) son; una pequeña parte de la localidad de Chapinero, y la localidad de Suba ubicada al norte de la ciudad, desde donde aumenta la velocidad del viento en sentido suroccidente. Estas zonas obtienen valores de temperatura intermedias de 14 a 14,5 °C.

Gran parte de la zona sur de la ciudad presenta igualmente valores bajos de velocidad del viento (de 1 a 1,6 m/s) en las localidades Ciudad Bolívar, Tunjuelito, Rafael Uribe Uribe, San Cristóbal y Usme, con temperaturas promedio de 13,5 a 14,5°C.

La dirección del viento presenta una confluencia en el occidente del perímetro urbano de Bogotá, aproximadamente alrededor de la localidad de Kennedy, donde la velocidad del viento y la temperatura es más alta. Los vientos vienen claramente desde el occidente en la zona norte de la ciudad, donde se registran temperaturas intermedias y velocidad del viento es baja. Por último, en la zona sur de la ciudad, los vientos vienen del suroccidente.

7.4.3.3 Desarrollo de la regresión no lineal multivariable

Teniendo como datos de entrada la consolidación de la tabla de registros de variables ambientales y el logaritmo de la presión parcial $Ln(P)$ del Aroclor 1260 para la totalidad de la muestra de transformadores de distribución objeto de evaluación en el perímetro urbano de Bogotá, se diseñó una matriz de cálculo en Microsoft Excel versión 365, con cuatro columnas para cada una de las variables y 10381 filas, asociadas a los registros de dichas variables (Ver *Anexo2,3,4,5*).

Teniendo en cuenta la ecuación [18], los registros de las variables independientes analizadas correspondieron a los datos interpolados de temperatura ($1000/T$), velocidad del viento (v), y dirección del viento (\overline{V}) en cada punto geográfico asociado a la ubicación de los transformadores de distribución de la muestra, donde se presenta potencialmente el escenario de riesgo (fuga o derrame de aceite dieléctrico con contenido de PCB's), y la variable dependiente corresponde al logaritmo natural la presión parcial $Ln(P)$ del Aroclor 1260 en el escenario de riesgo descrito.

Esta base de datos (Ver Anexo 6) fue importada al software SigmaPlot V.14.0 para ajustar la ecuación y los parámetros (a), (b), (k). La regresión no lineal está definida por la ecuación [20]

$$Ln(P) = a \left(\frac{1000}{T} \right) + \frac{b}{v} + \frac{2,34x 10^{-3}m^2/h}{\overline{V}} + j [20]$$

El análisis estadístico de la regresión no lineal [20], se ejecutó mediante la herramienta *Regression Wizard*, editando manualmente la ecuación mediante la categoría *User defined*. Para efectos de simplicidad en el análisis estadístico de los datos se renombraron las variables de la regresión [20] en el software SigmaPlot V.14.0 de la siguiente manera

1. $\frac{1000}{T} = x$
2. $v = z$
3. $\overline{(V)} = k$
4. $j = d$
5. $\ln(P) = f$

La regresión no lineal preliminar [20] no obtuvo un buen ajuste, por lo que la regresión no lineal fue modificada en el software SigmaPlot V.14.0, cambiando los operadores matemáticos de las variables y haciendo uso de parámetros de ajuste con el objetivo de obtener un coeficiente de correlación R^2 cercano a 1. A pesar de las modificaciones, el ajuste del modelo no fue satisfactorio, obteniendo coeficientes de correlación R^2 entre 0,170 y 0,241. Sin embargo, en este proceso de ajuste se concluyó que el modelo alcanza mejores aproximaciones cuando se toma el valor de presión parcial (P) en pascales, en lugar de $\ln(P)$ en atmósferas.

La limitación en el ajuste estadístico del modelo podría justificarse en la medida que para un mismo valor de la variable dependiente $\ln(P)$, las variables independientes T , v y $\overline{(V)}$ toman diferentes valores, alcanzando análisis estadísticos de hasta 200 iteraciones. En otras palabras, el comportamiento de los datos sugeriría que se podría presentar el mismo valor de concentración de Aroclor 1260, expresado como presión parcial en diferentes puntos geográficos del perímetro urbano de Bogotá con valores aleatorios de temperatura, velocidad y dirección del viento, subestimando la correlación de las variables ambientales y la distribución del contaminante.

Dada dicha variabilidad en los registros, y para mejorar la predicción del modelo, se realizó un tratamiento de la información de entrada seleccionando grupos de datos en función de la variación de la presión parcial de la solución de aceite dieléctrico con contenido de Aroclor 1260. Se seleccionó un rango de variación de (P) en el orden de 0,01 Pa para la agrupación de datos. De esta forma, se delimitaron 21 grupos de valores de presión parcial, en los que se determinó el promedio de las variables ambientales independientes registradas T , v y $\overline{(V)}$ como se muestra en la *Tabla 23*.

Tabla 22. Delimitación de grupos de datos para el ajuste del modelo de comportamiento fisicoquímico del Aroclor 1260

Grupo de datos (No)	Presión parcial de la solución (Pa)	Temperatura Promedio (K)	Velocidad del Viento Promedio (m/h)	Dirección del Viento Promedio (radianes)
1	3,02E-07	287,1	6946	3,61
2	2,90E-07	287,1	5950	2,50
3	2,46E-07	286,9	5553	1,27
4	2,02E-07	287,0	6169	2,65
5	1,95E-07	287,0	5820	2,59
6	1,64E-07	286,7	7611	3,87
7	1,39E-07	287,2	5891	2,48
8	1,33E-07	286,8	7185	3,21
9	1,01E-07	287,2	7700	3,59
10	9,46E-08	287,6	6111	2,64
11	8,83E-08	287,6	6019	2,56
12	8,20E-08	287,6	5785	2,52
13	7,57E-08	287,4	6122	2,58
14	6,93E-08	287,4	5920	2,61
15	6,30E-08	287,4	6356	2,96
16	5,68E-08	287,4	5194	2,86
17	5,04E-08	287,4	6186	2,23
18	4,41E-08	287,4	6277	2,73
19	3,78E-08	287,5	4525	1,51
20	2,52E-08	287,3	5688	3,57
21	6,30E-09	287,4	6035	2,56

Fuente: Autor, 2018.

Para el ajuste del modelo de comportamiento fisicoquímico del Aroclor 1260 en la atmósfera, podría sugerirse que la abstracción de los datos resulta consistente, en la medida que la desviación estándar de las variables independientes es uniforme como se muestra en la *Tabla 24*.

Tabla 23. Desviación estándar de las variables del modelo

Grupo de datos (No)	Número de registros (No)	Presión parcial de la solución (Pa)	Temperatura (K)	Velocidad del Viento (m/h)	Dirección del Viento (radianes)
1	2786	9,46E-08	0,3	919	0,91
2	2345	7,57E-08	0,1	882	0,91
3	1250	6,30E-09	0,1	883	0,90
4	796	8,83E-08	0,1	866	0,86
5	622	6,93E-08	0,0	843	0,92
6	595	2,02E-07	0,2	981	0,90
7	534	1,39E-07	0,5	851	0,93
8	390	1,95E-07	0,3	775	0,94
9	357	8,20E-08	0,1	758	0,93
10	348	4,41E-08	0,0	874	0,91
11	338	2,90E-07	0,1	904	0,91
12	5	5,04E-08	0,0	841	0,90
13	4	6,30E-08	0,0	1292	0,91
14	2	5,67E-08	0,0	120	1,47
15	1	3,03E-07	-	-	-
16	1	2,46E-07	-	-	-
17	1	1,64E-07	-	-	-
18	1	1,32E-07	-	-	-
19	1	1,01E-07	-	-	-
20	1	3,78E-08	-	-	-
21	1	2,52E-08	-	-	-

Fuente: Autor, 2018.

La variabilidad de la temperatura y la dirección del viento es baja en el perímetro urbano de Bogotá, según el informe anual de calidad del aire de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire RMCAB, lo cual se evidencia en la *Tabla 20*. La desviación de la velocidad del viento es un poco mayor, sin embargo, la variabilidad es similar entre las secciones de datos abstraídas.

Por otra parte, el análisis de los datos permite afirmar que el mayor número de registros está asociado a la concentración de Aroclor 1260 en aceite dieléctrico de 15ppm (2786 registros), 12ppm (2345) y 1 ppm (1250). Una vez efectuados los reajustes necesarios (Ver *Anexo 7*), la expresión que define el comportamiento del Aroclor 1260 en la atmósfera, al entrar en contacto con el ambiente dada la fuga de aceite dieléctrico de transformadores de distribución en el perímetro urbano de Bogotá se muestra en la ecuación [26].

$$(P) = aT + bv^2 + c(\overline{V})^3 + 2,34x10^{-3} \frac{m^2}{h} d \quad [26]$$

Donde (a) obtiene un valor de $-2,3361x10^{-7} \frac{K}{Pa}$,

(b) obtiene un valor de $2,8055x10^{-16} \frac{h^2Pa}{m^2}$,

(c) obtiene un valor de $-8,0018 x 10^{-10} \frac{h^3Pa}{m^3}$,

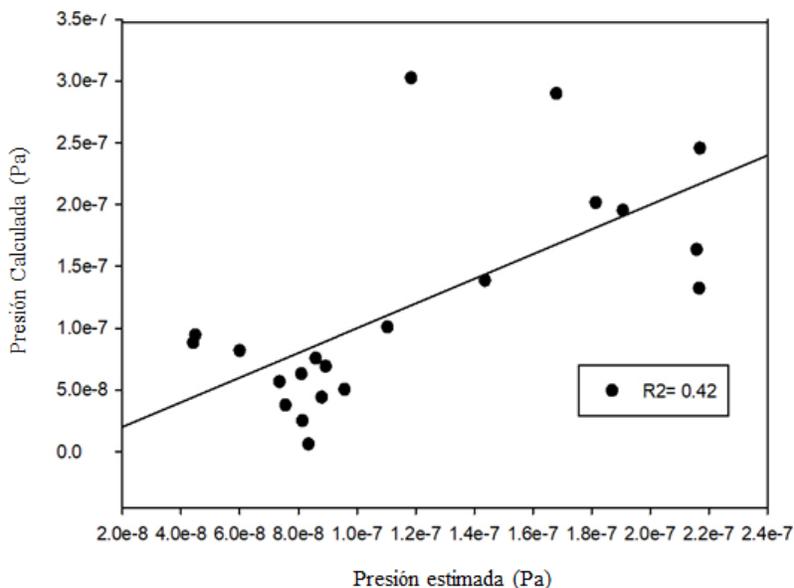
y d obtiene un valor de $\frac{0.0287Pah}{m^2}$.

Por lo que el modelo se escribe como la ecuación [27].

$$(P) = 2,8055x 10^{-16}v^2 - 2,3361x 10^{-7}T - 8,0018 x 10^{-10}(\overline{V})^3 + [0,0287 \frac{0.0287Pah}{m^2} 2,34x \frac{10^{-3}m^2}{h}] [27]$$

El modelo fisicoquímico del comportamiento de PCB, obtuvo un coeficiente de correlación R^2 de 0,4532 como se muestra en la *Figura 19* y el *Anexo 8*.

Figura 19. Regresión no lineal multivariable para la estimación de presión del sistema



Fuente: Autor, 2018

Para analizar la correlación de esta regresión no lineal multivariable se realizó una comparación este valor y los resultados obtenidos por los modelos fisicoquímicos revisados en la Sección 7.4.2.2. En primer lugar, cabe mencionar que en el estudio adelantado por Harner & Jones, (1995), el cual relaciona la fugacidad de PCB's entre la matriz suelo y atmósfera con la difusividad del compuesto en el ambiente, no se evidencia el coeficiente de correlación de la función planteada.

Por otra parte, el modelo Finizio, Mackay, Bidelmang, & Harner, (1997) alcanza un R^2 de 0,79 para la correlación del coeficiente de partición (Kp) y el coeficiente de partición octanol aire (KoA) de los compuestos organoclorados analizados incluyendo los PCB's. Este coeficiente es cercano a 1, demostrando la correlación exitosa de las variables, sin embargo, se debe tener en cuenta que el modelo plantea una variable dependiente y una sola variable independiente, lo cual facilita la relación de las mismas.

El modelo diseñado en este estudio no considera la población como variable independiente para la estimación de la presión parcial del PCB, a diferencia del modelo Venier & Hites, (2010), que alcanza un R^2 de 0,81, precisamente por la inclusión de este parámetro que representa el 54,7% de su correlación. No incluir la población en el diseño del modelo, radicó en el interés de generar una herramienta que considerara las variables fisicoquímicas del sistema (temperatura, velocidad del viento, y dirección del viento) sin tener en cuenta el componente demográfico del mismo, esta decisión pudo haber limitado el ajuste de la regresión, que alcanzó un coeficiente de correlación de 0,4532. Además, otro factor limitante en este valor pudo haber sido la propagación del error en el cálculo de las variables ambientales, determinadas mediante métodos estadísticos de interpolación.

Esto no quiere decir que la aproximación no tenga significado físico, ya que existe una relación directa entre las variables dependientes y la variable independiente del sistema químico estudiado. Por lo tanto,

la confianza en la reproducibilidad de los datos, aunque está limitada por el valor del coeficiente de correlación, presenta un aporte significativo al modelamiento del comportamiento fisicoquímico del contaminante en el área de estudio.

Finalmente, se puede evidenciar según el comportamiento de los datos en la Figura 17, que el modelo realiza una mejor predicción de la presión parcial del Aroclor 1260 cuando las concentraciones de la sustancia en aceite dieléctrico son menores, basado en la dispersión o desviación de los datos a la línea por los puntos experimentales. Por otra parte, en sistemas cuya presión parcial, y, por ende, la concentración de la sustancia incrementa, la dispersión de los datos puede generar sobre estimación o subestimación de la variable según el rango analizado.

7.4.4 *Cuantificación de la exposición ambiental al Aroclor 1260*

7.4.4.1 *Definición del área de impacto del riesgo de exposición a PCB's*

Como se ha mencionado anteriormente, la metodología de evaluación del riesgo ambiental asociado a PCB's en transformadores de distribución de Codensa S.A E.S.P. plantea la cuantificación del riesgo desde la estimación del alcance espacial de la sustancia en la atmósfera.

Este alcance espacial puede ser entendido como el área de impacto del riesgo (Dirección General de Calidad Ambiental. Ministerio del Ambiente de Perú, 2016), que será calculado gracias al modelo fisicoquímico del comportamiento del Aroclor 1260, expresado mediante la ecuación [26].

$$(P) = aT + bV^2 + c(\overline{V})^3 + 2,34x10^{-3} \frac{m^2}{h} d [26]$$

La variable difusividad (D) en esta expresión toma el valor de $2,34x10^{-3} \frac{m^2}{h}$ (Harner & Jones, 1995), representando la rapidez de difusión del Aroclor 1260 por unidad de área de sección transversal en una dirección determinada, haciendo referencia al proceso irreversible en el cual las partículas se introducen en un medio (atmósfera), en el cual no se encontraban inicialmente (Laidler & Meiser, 2013). Esta difusión es proporcional al cambio de concentración del soluto, en este caso, la mezcla comercial de PCB Aroclor 1260 en una dirección, y se describe mediante la Ley de Fick, como se describió anteriormente.

Dicho parámetro fisicoquímico relaciona directamente el comportamiento de esta sustancia orgánica y su capacidad de movilidad en un área y tiempo definido. Así, al desarrollar la derivada parcial de la ecuación [6] con respecto a la difusividad, se obtiene el cambio de la presión parcial por unidad de área sobre tiempo. Si bien la difusividad toma un valor particular en el modelo, puede ser expresada como variable para la comprensión de la distribución de la sustancia. El desarrollo de la derivada parcial de la ecuación [6] se muestra a continuación

$$\frac{\partial P}{\partial D} = a \frac{\partial T}{\partial D} + b \frac{\partial V^2}{\partial D} + c \frac{\partial (\overline{V})^3}{\partial D} + d \frac{\partial D}{\partial D} [28]$$

$$\frac{\partial P}{\partial D} = d \frac{\partial D}{\partial D} [29]$$

$$\frac{\partial P}{\partial D} = d [30]$$

Realizando el análisis dimensional del parámetro d en la ecuación [26], se puede evidenciar el fundamento del cálculo del área de impacto del riesgo ambiental [31], teniendo en cuenta que la presión P se establece en pascales (Pa), la difusividad D en $(\frac{m^2}{h})$ y el parámetro d en $(\frac{Pa \cdot h}{m^2})$.

$$\frac{Pa}{\frac{m^2}{h}} = d = \frac{Presión}{\frac{área}{tiempo}} \quad [31]$$

Despejando el área en la ecuación [31] se obtiene la expresión [32] para calcular el alcance de la exposición al Aroclor 1260.

$$area = \frac{Presión \times tiempo}{d} \quad [32]$$

Conociendo el valor del parámetro d gracias a la ecuación [27] $(\frac{0.0287Pa \cdot h}{m^2})$, y estableciendo un tiempo de evaluación del área de impacto del riesgo para un periodo de 1 año (8760 horas), se puede estimar la extensión o alcance del riesgo, definida como el área de impacto del contaminante cuando entra en contacto con el ambiente dada la fuga o derrame de aceite dieléctrico en transformadores de distribución instalados en las redes de distribución de Codensa S.A E.S.P. Esta estimación se realizó en una base de datos elaborada en Microsoft Excel Versión 365 para cada dato de presión parcial, asociada a la concentración de Aroclor 1260, en cada uno de los 10381 transformadores objeto de evaluación.

El área de impacto del riesgo puede ser expresado en distancia del alcance de la exposición a PCB, asumiendo que el área de distribución del PCB es equivalente a una circunferencia. El cálculo mencionado se describe en la ecuación [33].

$$distancia \ de \ alcance = \sqrt{\frac{area \ de \ impacto}{\pi} \times 2} \quad [33]$$

Después de realizar los cálculos (Ver Anexo 9) en cada una de las ubicaciones geográficas donde podría generarse el derrame o fuga de aceite dieléctrico, se estima que las concentraciones de Aroclor 1260 en el aceite dieléctrico de los transformadores de distribución podrían producir la exposición de la población al contaminante en distancias comprendidas en un rango desde 49,50 hasta 577,20 metros.

La moda de los valores de extensión o alcance del riesgo se encuentra en un rango de 49,50 a 335,70 metros, cuya media aritmética es de 192,35 metros. Teniendo en cuenta lo anterior, se determinan dos niveles de alcance del riesgo; a saber, riesgo localizado o extenso. El riesgo localizado se establece como el alcance de la exposición al Aroclor 1260 a una distancia menor de 200 metros, mientras el riesgo extenso se establece como el alcance de la exposición a una distancia superior a esta como se presenta en la Tabla 25.

Tabla 24. Categorías del riesgo según su extensión

Extensión del riesgo	Rango de alcance de exposición
Extenso	>200metros
Localizado	<200metros

Fuente: Autor, 2018

Es importante recalcar que el alcance de la exposición no aumenta necesariamente con la concentración de Aroclor 1260 en el aceite dieléctrico de transformadores de distribución, por lo que no sería válido concluir que, a mayor concentración del contaminante en el aceite, incrementa la distancia el alcance de PCB en la atmósfera. Esto se debe a que las variables ambientales juegan un papel importante en la distribución del contaminante y, por ende, en la aproximación de la extensión del riesgo ocasionado por la fuga o derrame de aceite con contenido de PCB's de transformadores de distribución eléctrica instalados en las redes de Codensa S.A E.S.P.

Determinación de zonas de riesgo de exposición del Aroclor 1260

La Resolución 222 del 2011, en el artículo 33, define como medida de reducción del riesgo de exposición a PCB's, la prioridad de identificación y eliminación de uso de equipos contaminados en las siguientes zonas: las plantas de servicio animal, hospitales, instituciones educativas, industrias farmacéuticas y de producción de alimentos, plazas de mercado, plazoletas de comida en centros comerciales y plantas de tratamiento de agua potable (MADS, 2011).

Sin embargo, esta normativa no establece a qué distancias de estos establecimientos se considera que un equipo representa riesgo de exposición a la comunidad. Desde un punto de vista espacial, la definición de zona de riesgo en la Resolución está más ligada a la definición de un sitio de riesgo, ya que el concepto se interpreta como una ubicación puntual. Por consiguiente, para la definición de las zonas de riesgos se generaron polígonos en función de la agrupación de los sitios de riesgo definidos por la resolución, para lograr este objetivo se siguieron los pasos que se explican a continuación.

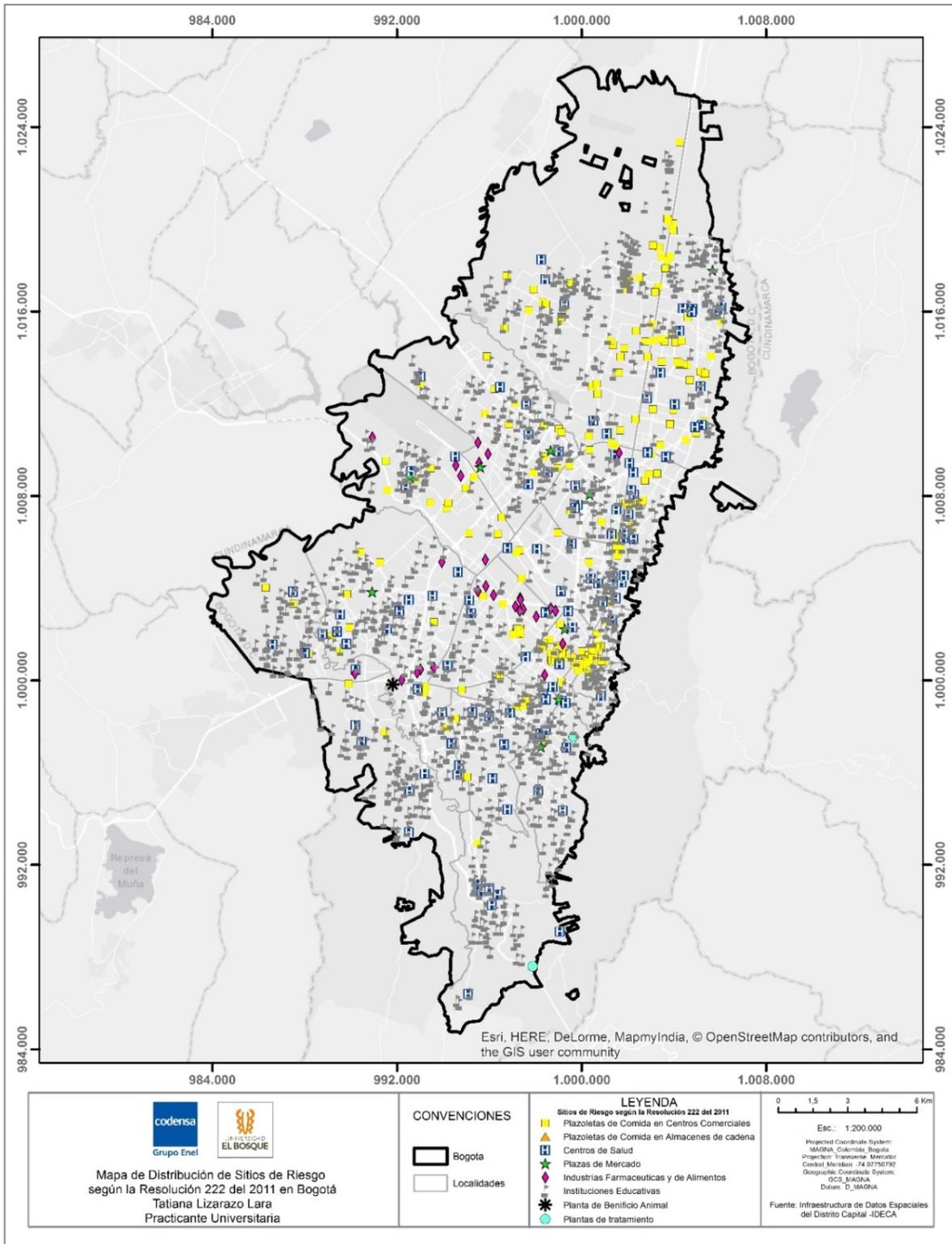
En primer lugar, se generó un mapa de distribución espacial de los sitios de riesgo definidos por la resolución, como datos de entrada se empleó la capa de Sitios de Interés del Distrito Capital disponible en el portal web del IDECA, Infraestructura de Datos Espaciales del Distrito Capital, coordinada por la Unidad Administrativa Especial de Catastro (UAECD, 2017).

Los sitios de interés registrados en esta capa incluyen además de los sitios de riesgo definidos por la resolución, otros sitios como aeropuertos, establecimientos de administración pública, parques, y otra información que no se tiene en cuenta en el estudio. Por esta razón, se realizó un filtro de la tabla de atributos de esta capa en Excel versión 365, con el objetivo de obtener únicamente los sitios de riesgo definidos en la Resolución 222 de 2011.

Cabe aclarar que los únicos sitios que no se encontraron registrados en la capa del IDECA correspondieron a las plantas de tratamiento de agua potable (PTAB's). Para la ubicación geográfica de dichos sitios, se tomaron las ubicaciones reportadas en los mapas de riesgo de la calidad del agua para consumo humano generados por la Secretaría Distrital de Salud (2015), disponibles en la página web del Observatorio de Salud Ambiental de Bogotá (Secretaría Distrital de Salud, 2014-2017).

Posteriormente, la base de datos consolidada con los sitios de riesgo de exposición a PCB's fue importada al software ArcGis versión 10.4, donde se realizó la corrección de la información, eliminando los puntos ubicados fuera del perímetro urbano de Bogotá. Para esto se empleó la herramienta *Intersect*, estableciendo como *Input entities* la capa sitios de interés y la de perímetro urbano (Arcgis for Desktop, 2017). El mapa de distribución de sitios de riesgo se muestra en la *Figura 19*.

Figura 20. Mapa de distribución de sitios de riesgo en el perímetro urbano de Bogotá



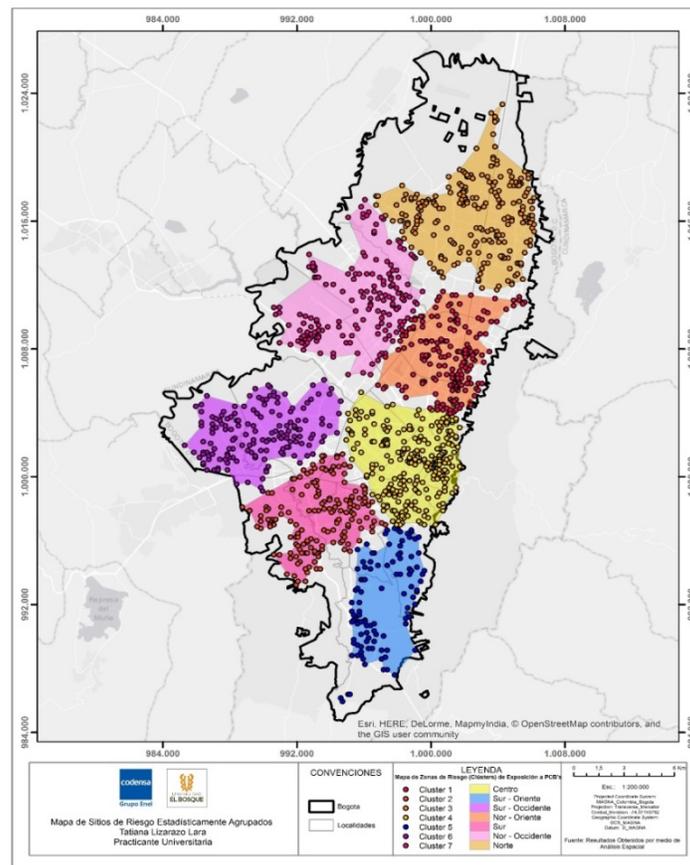
Fuente: Autor, 2018.

Una vez generado este mapa, se realizaron agrupaciones de los sitios de riesgo en función de su proximidad, esto para definir zonas de riesgo que concentran la mayor cantidad de estos sitios. Este tipo de agrupación está definida estadísticamente como clusters o conglomerados, que se pueden generar en el entorno de software libre R para computación y gráficos estadísticos (R, 2018).

Para determinar el número apropiado de conglomerados (clusters), el software R genera un análisis para determinar el número de agrupaciones que representa de manera estadísticamente significativa la distribución espacial de los datos, empleando una prueba que genera un gráfico de la suma de cuadrados dentro de los grupos por número de conglomerados extraídos (Kabacoff, Robert, 2017). Teniendo en cuenta lo anterior, el número de clusters o zonas de riesgo obtenidos mediante el software es igual a 7

Para la generación de los clusters, se empleó el método de partición más popular *K-means clustering*, cuyo objetivo es la partición de un conjunto de n datos en k clusters, donde cada dato pertenece al cluster cuyo valor medio es más próximo (Kabacoff, Robert, 2017). La tabla de datos generada por el software R se importó al software ArcGis versión 10.4 para la representación geográfica de las zonas de riesgo, como se muestra en el la *Figura 20*.

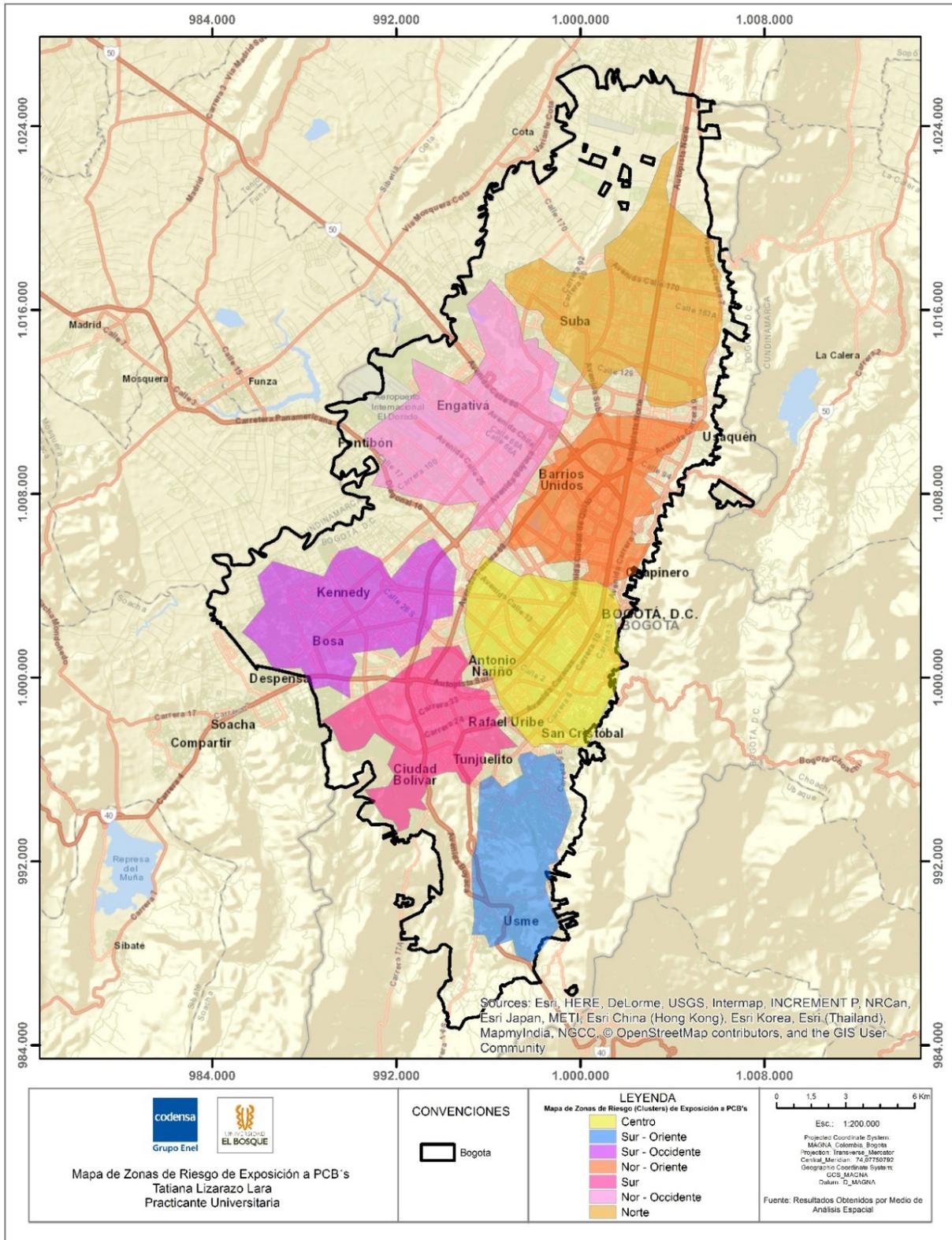
Figura 21. Mapa de zonas de riesgo representadas en el perímetro urbano de Bogotá



Fuente: Autor, 2018.

Para la mejor comprensión de la ubicación de las zonas de riesgo de exposición a PCB's, se modificó el mapa de la *Figura 19*, aplicando una capa base que muestra las vías y localidades del perímetro urbano de Bogotá, lo que permite darle un nombre a las zonas de riesgo (clusters) con base a su localización, como se presenta en la *Figura 21*.

Figura 22. Mapa de zonas de riesgo localizadas en el perímetro urbano de Bogotá



Fuente: Autor, 2018.

Si se analizan las *Figuras 19 y 20* se puede evidenciar que las zonas de riesgo centro y nororiente presentan una mayor concentración de sitios de riesgo, por lo que merecen una mayor atención en la gestión ambiental de PCB's. La zona centro concentra una gran cantidad de plazoletas de comida en centros comerciales e industrias de farmacéuticos y alimentos, y la zona nororiente concentra sobretudo una gran cantidad de instituciones educativas y hospitales.

7.4.4.2 *Definición de las categorías del riesgo y análisis geoestadístico*

Para categorizar el riesgo de exposición a PCB's en un derrame o fuga de aceite dieléctrico de transformadores de distribución en un punto específico del perímetro de Bogotá, se debe tener en cuenta en primer lugar qué extensión alcanzaría la exposición provocada por el incidente, y en segundo lugar si el evento se presenta o no en una zona de riesgo.

Si el alcance de la exposición es extenso y se presenta en una zona de riesgo, el riesgo de exposición se categoriza como alto, ya que el contaminante puede distribuirse considerablemente sobre un área impactando sitios de interés según la Resolución 222 de 2011. Cuando el derrame o fuga de aceite dieléctrico no sucede en una zona de riesgo, pero el alcance de la exposición sigue siendo extenso, se considera que el riesgo de exposición es bajo, ya que, si bien no se afectan directamente sitios de interés definidos por la resolución, el contaminante se podría distribuir ampliamente favoreciendo la inhalación del mismo.

Por otra parte, si el alcance de la exposición es localizado y se presenta en una zona de riesgo, la categorización indica que el riesgo es moderado, ya que el contaminante se distribuye en menor proporción, pero sin embargo sigue impactando probablemente sitios que aumentan el riesgo de exposición al contaminante. Finalmente, el riesgo se considera bajo cuando el nivel de exposición del Aroclor es localizado y no se presenta en una zona de riesgo, ya que de ser detectada la fuga o derrame de forma oportuna, se podría atender rápidamente evitando su distribución en el ambiente. El análisis generado para la caracterización del riesgo se resume en la *Tabla 26*.

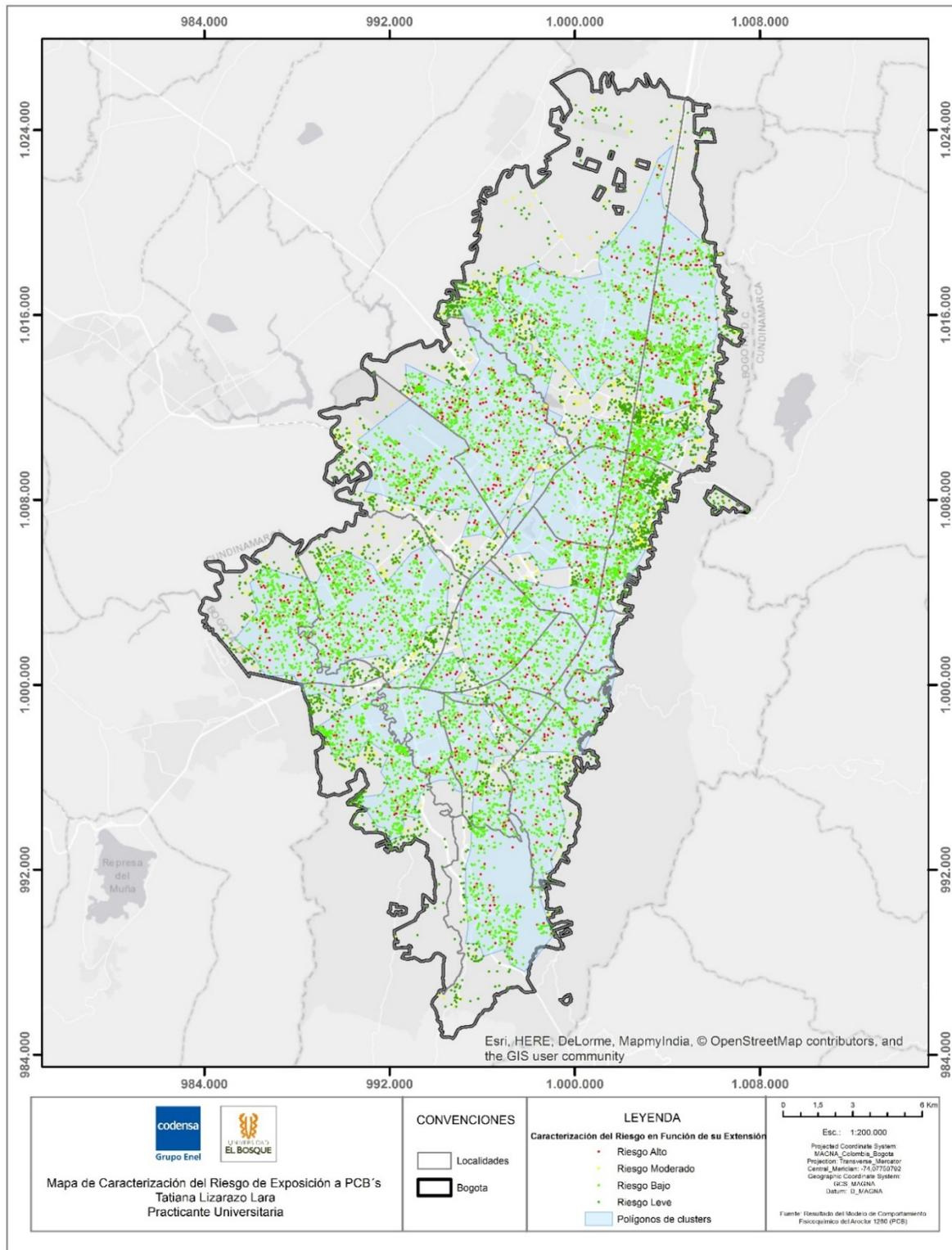
Tabla 25. Criterios para la caracterización del riesgo ambiental asociado a PCB's (Aroclor 1260)

Nivel del alcance del riesgo	Ubicación del Derrame o Fuga en Zona de Riesgo	
	SI	NO
Extenso	Riesgo Alto	Riesgo Bajo
Localizado	Riesgo Moderado	Riesgo Leve

Autor, 2018

Para el análisis geoestadístico de los datos se contaba de antemano con una base de datos con los registros del nivel del alcance del riesgo para la ubicación geográfica de cada transformador de distribución de Codensa S.A E.S.P objeto de estudio, dicha base se importó al software de información geográfica ArcGis versión 10.4, para la generación de una capa que representara el nivel de riesgo 1 (extenso), y el nivel de riesgo 2 (localizado). Así mismo, se disponía de la capa de clusters que representa las zonas de riesgo de exposición a PCB's, por lo que se realizaron diferentes intersecciones espaciales en los polígonos (clusters), para identificar cuáles de los transformadores en nivel de alcance de riesgo 1 o 2 se encontraban contenidos en el área de riesgo definida por un cluster. También se hizo uso de la herramienta *Select by location* para generar la clasificación del dato. El mapa de caracterización del riesgo se muestra en la *Figura 22*.

Figura 23. Mapa de caracterización del riesgo de exposición a PCB's



Fuente: Autor, 2018

Para establecer las zonas de riesgo prioritarias para la formulación de los lineamientos de la estrategia del riesgo, se calcula la probabilidad del riesgo alto en cada zona de riesgo, por el área de dicha zona como se muestra en la siguiente ecuación [34] y se presenta en la *Tabla 27*. La frecuencia del riesgo fue calculado mediante la selección por localización de los datos (entendidos como puntos de riesgo) en una zona de riesgo específica mediante la herramienta *Select by location* y el área de la zona de riesgo es un atributo de la capa de datos geoespaciales generados en el software de información geográfica.

$$\text{Indice de Riesgo} = \frac{\left(\frac{\text{Frecuencia de Riesgo Alto}}{\text{Frecuencia de Riesgo Total}}\right) \times 100}{\text{Area de la zona de riesgo}} \quad [34]$$

Este índice fue generado especialmente para este estudio, sin embargo su diseño parte del concepto establecido en la metodología de evaluación del riesgo consiguado en la norma “*UNE 150008:2008*”, donde se propone la estimación del riesgo desde una ecuación matemática [35].

$$\text{Riesgo} = \text{Probabilidad} / \text{Frecuencia} \times \text{Gravedad de las consecuencias} \quad [35]$$

En este sentido el numerador en la ecuación [34] mostraría la probabilidad de la frecuencia de exposición a PCB’s categorizada en riesgo alto en un cluster o zona de riesgo, mientras el denominador implicaría la gravedad de las consecuencias, en la medida que para una misma probabilidad de frecuencia, a menor área de estudio mayor será el riesgo asociado. Esto se explica porque la concentración del riesgo de exposición es mayor cuando el área de la zona de riesgo es menor, por esta razón el índice planteado en la ecuación [34] invita a ser interpretado como el cálculo de la densidad de riesgo de exposición por inhalación a PCB’s en una zona de riesgo.

Tabla 26. Cálculo del índice de riesgo para la caracterización del mismo

Zona de Riesgo	Frecuencia de Riesgo Alto (No)	Frecuencia de Riesgo Total (No)	Area(km) ²	Indice (%/km) ²	Prioridad
Norte	281	1439	51,07	0,38	7
Centro	162	1026	40,68	0,39	6
SurOccidente	179	1164	36,86	0,42	5
NorOccidente	271	1244	48,39	0,45	4
Sur	127	860	30,63	0,48	3
SurOriente	77	551	28,1	0,5	2
NorOriente	269	1396	33,49	0,58	1

Fuente: Autor, 2018.

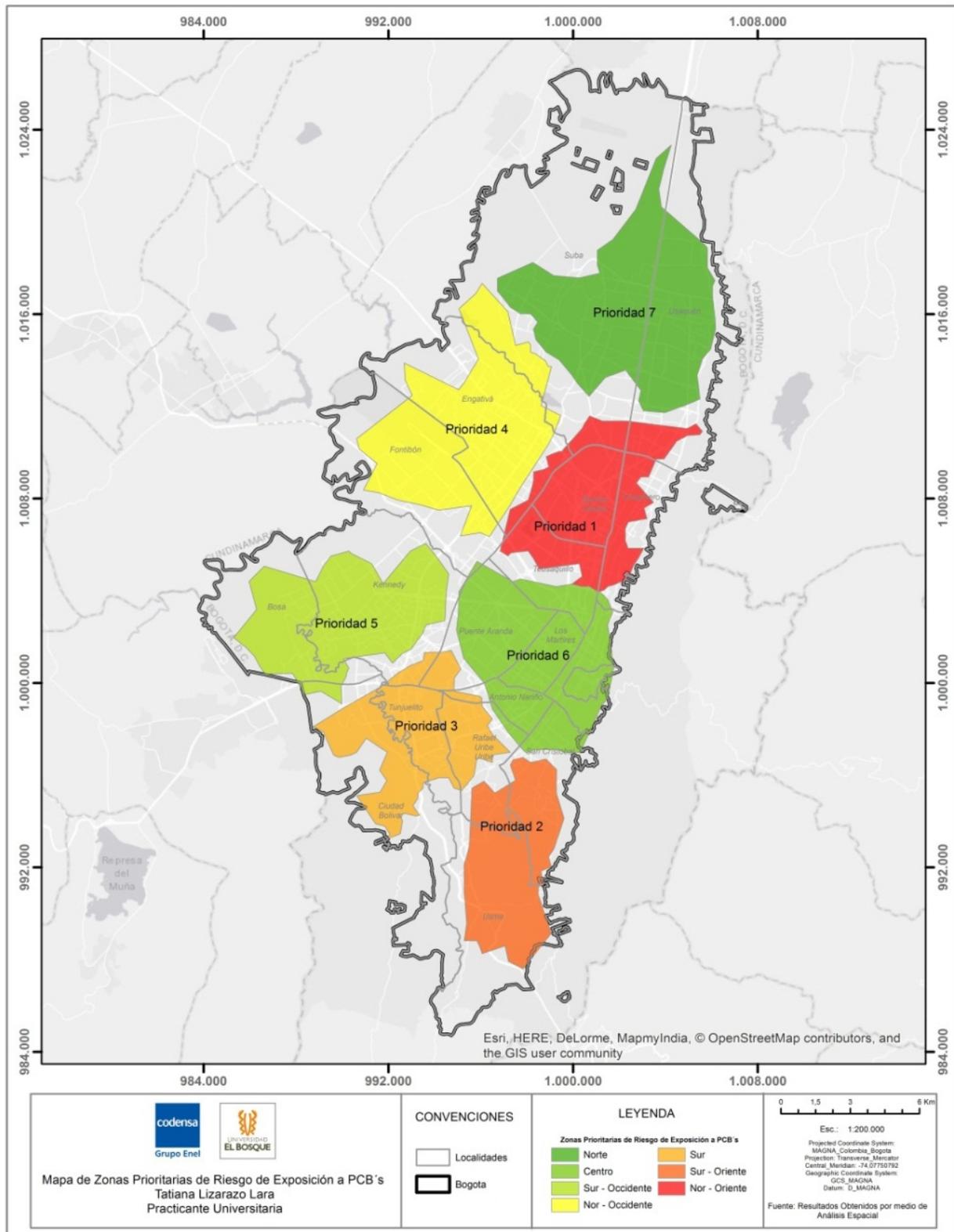
La frecuencia del riesgo alto hace referencia al número de eventos (fugas o derrames) que alcanzarían una categorización de riesgo alta en una zona o cluster definida, y la frecuencia de riesgo total, hace referencia al número de eventos probables en una zona de riesgo, dada la presencia de un

transformador de distribución eléctrica. El cálculo del porcentaje de la razón entre estas dos frecuencias indica la probabilidad de riesgo alto en una zona definida.

Al calcular el cociente de esta probabilidad entre el área de la zona de riesgo, se está haciendo una aproximación a la probabilidad de exposición alta a PCB's por unidad de área, en este caso kilómetros cuadrados. La zona que alcanza una mayor probabilidad de exposición alta a PCB's por área es la Nororiente, en donde se encuentran las localidades de Barrios Unidos, Teusaquillo y Chapinero.

El análisis de la ubicación de esta zona es interesante, ya que se encuentra rodeada de las zonas de riesgo con menor prioridad de riesgo (Zona Norte y Zona Centro), este fenómeno podría explicarse por las variables ambientales que condicionan el terreno, si se consulta el mapa de interpolación de velocidad y dirección del viento promedio en el perímetro urbano de Bogotá (*Figura 16*), se puede observar que en esta zona la dirección del viento, cuya velocidad es baja, describe un comportamiento envolvente hacia una barrera topográfica al costado oriente, lo que podría concentrar los niveles de PCB's. De manera contraria en la zona de riesgo 6 y 7 presentan velocidades del viento mayores, y la dirección favorece la circulación de la concentración de PCB's en la zona.

Figura 24. Mapa de Caracterización del riesgo en función de su extensión



Fuente: Autor, 2018

7.5 Lineamientos iniciales para la estrategia de comunicación del riesgo

La proposición de los lineamientos de la estrategia de comunicación del riesgo se debe llevar a cabo en la etapa de planeación de dicha estrategia (OPS, 2011), la cual permite sentar las bases para establecer la confianza entre la población, las autoridades y en general entre las partes interesadas de la actividad de Codensa S.A E.S.P.

Se tienen en cuenta dos consideraciones para fundamentar los lineamientos en mención, la primera corresponde al seguimiento de las condiciones consignadas en la *Guía para la Elaboración de la Estrategia de Comunicación del Riesgo, de la Teoría a la Acción*, elaborada por la Organización Panamericana de la Salud, (2011), en la cual se presentan los requerimientos asociados a la consolidación de la etapa de planeación de la estrategia de comunicación del riesgo.

La segunda consideración implica que los lineamientos de la estrategia de comunicación del riesgo se establecen en función de la población objetivo (OPS, 2011), dicha población es la corresponde a los habitantes y población flotante de la zona prioritaria de riesgo 1, equivalente a la zona de riesgo denominada “nororienté”, ubicados en las localidades de Chapinero, Barrios Unidos y Teusaquillo.

A continuación, se enlistan los lineamientos de la estrategia de comunicación del riesgo de exposición por inhalación del PCB Aroclor 1260 dirigida a la zona prioritaria de riesgo 1.

- Lineamiento 1: conformación del grupo de trabajo para la estrategia de comunicación del riesgo.

Es importante identificar a un grupo de profesionales que gestionarán las diferentes actividades de la estrategia y qué roles desempeñan en el grupo de trabajo. En este caso se plantea que el grupo de trabajo esté compuesto por un área de coordinación a cargo de la división de medio ambiente HSE Codensa S.A E.S.P, encargada de la programación de actividades, el contacto con las autoridades ambientales y la aprobación de estrategias de manejo ambiental del riesgo asociado a la exposición de PCB's, entre otras, en la *Tabla 28* se muestran los diferentes procesos transversales coordinados para la gestión ambiental integral del riesgo.

En las *Consideraciones para Fortalecer una Estrategia Suramericana para la Reducción del Riesgo de Desastres* emitidas por la Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción de Riesgos de Desastres (UNISDR, 2015), llevan a plantear que las decisiones que se tomen en el grupo de trabajo de comunicación del riesgo de exposición a PCB's, deben ser adoptadas en consenso, esto permite que las soluciones planteadas sean integrales y se aborden desde los conceptos técnicos de cada una de las áreas que conforman el grupo, favoreciendo el balance de las medidas emitidas. Los representantes de la División de Medio Ambiente HSE concertarán los temas prioritarios y la agenda para coordinar la conformación y el seguimiento de la estrategia, definiendo las principales líneas generales para orientar las acciones.

Tabla 27. Procesos coordinados por la división HSE en la gestión del riesgo asociado a PCB's

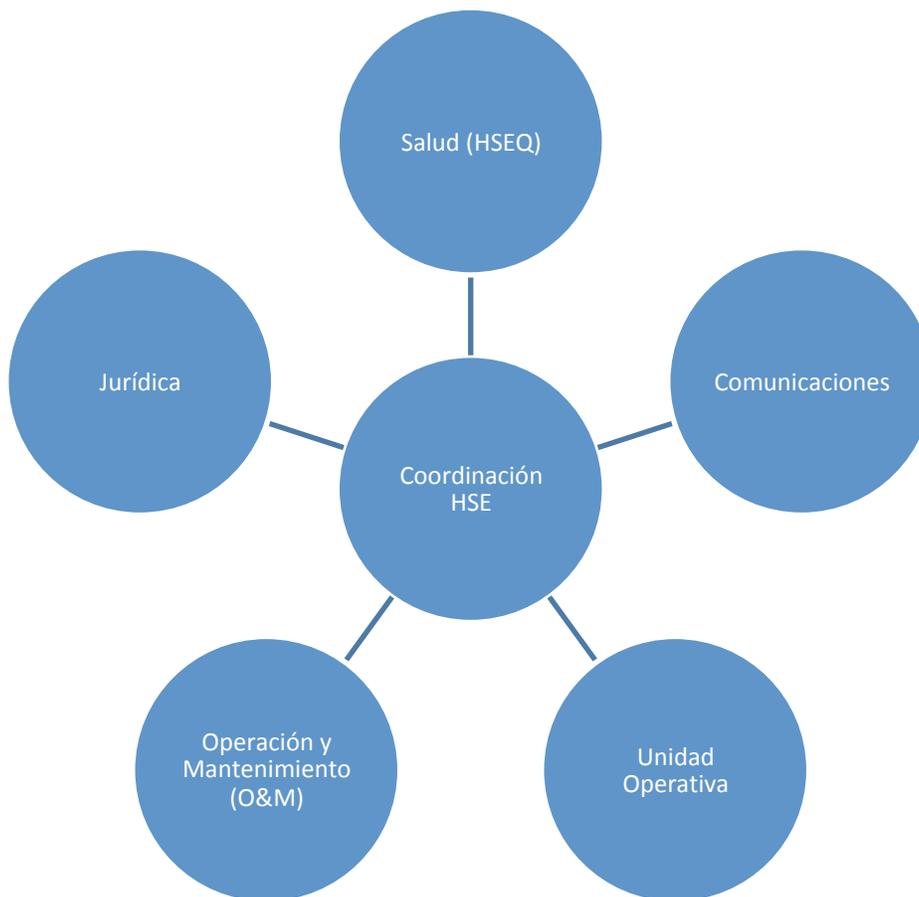
		Proceso coordinado	
Proceso de gestión ambiental del riesgo	Formulación del problema	Selección del área de estudio	La división de medio ambiente HSE define el contexto de la evaluación del riesgo conforme a los objetivos estratégicos planteados desde el sistema de gestión ambiental de Codensa S.A. E.S.P, cuyo seguimiento es llevado a cabo por la gerencia de Infraestructura y Redes
		Definición del alcance de la evaluación del riesgo	La división de medio ambiente HSE, siguiendo las recomendaciones del área jurídica de Codensa S.A E.S.P., selecciona el objetivo de la evaluación del riesgo para dar alcance a la Resolución 222 de 2011
	Análisis del riesgo	Definición de la metodología de evaluación de riesgo	La división de medio ambiente HSE desarrolla las herramientas técnicas para la evaluación del riesgo, que pueden ser complementadas con los aportes de profesionales en salud para el análisis de efectos a la salud. Los datos de entrada de para el diseño de la metodología son aportados por las empresas colaboradoras que atienden incidentes ambientales y el área de Operación y Mantenimiento, que posee dentro de su proceso el manejo de PCB's
		Análisis de la exposición	La división de medio ambiente HSE implementa la metodología de evaluación del riesgo que brinda una aproximación a la distribución del contaminante, define los plazos para actualizarla e interpreta los resultados para estimar el nivel de alcance de la exposición
		Análisis de efectos	La división de medio ambiente HSE se apoya de un equipo de profesionales en salud, para complementar los resultados de la metodología, ya que a partir de la estimación del alcance de la exposición no se pueden determinar explícitamente los riesgos a la salud
		Caracterización del riesgo	La división de medio ambiente HSE caracteriza el riesgo gracias a la delimitación de zonas prioritarias, mediante este resultado final del análisis del riesgo, la división da respuesta las necesidades técnicas y procedimentales para direccionar la gestión del riesgo
	Gestión del riesgo	Manejo del riesgo	La división medio ambiente HSE además de coordinar la estrategia de comunicación del riesgo, debe velar por la minimización y revención del mismo, más allá del control operacional, es por eso que actúa junto con las empresas colaboradoras de atención a incidentes y con Operación y Mantenimiento para la elaboración de planes de acción que faciliten la detección de la causa raíz de fugas o derrames
		Comunicación del riesgo	La división medio ambiente HSE direccionará la planificación de la estrategia del riesgo, se generarán medidas de reacción frente a la exposición a PCB's en conjunto con el área de salud para minimizar los efectos del contaminante en la salud de la comunidad y el personal de trabajo, por otra parte, la definición de los canales de comunicación, la presentación del mensaje y los escenarios de comunicación será debatida con el área de comunicaciones

Fuente: Autor, 2018.

A partir de estas consideraciones, se propone en la estructura del grupo de trabajo un área de salud, a cargo de dos representantes de la división HSEQ, direccionen el enfoque de salud ocupacional de la estrategia. Inicialmente, la Unidad Operativa de Bogotá (Zona Norte) a cargo de la coordinación de las empresas colaboradoras para la atención de incidentes o emergencias ambientales, también tendrá un representante en el grupo de trabajo, encargado de llevar el seguimiento de reportes asociados al monitoreo de los escenarios de riesgos postulados desde la implementación de la metodología, y la proposición de acciones de mejora para la minimización del riesgo de exposición inicialmente, en las localidades de la zona de riesgo. De manera homóloga la unidad de Operación y Mantenimiento contará con un representante para el seguimiento de indicadores de mantenimiento preventivo y la formulación de medidas y planes de acción para la minimización del riesgo.

También se deberá contar con profesionales de la salud, preferiblemente en el área de toxicología que estén dispuestos a dialogar con el público a través de diferentes canales de comunicación, y que complementen el análisis de efectos del riesgo en esta metodología, para la comprensión del impacto a la salud ocasionado por este contaminante, en este sentido, la información socializada tendrá un soporte desde el punto de vista toxicológico. El diseño audiovisual es un componente fundamental en la estrategia de comunicación del riesgo, por lo que el grupo de trabajo contará con el apoyo del equipo de comunicaciones Codensa S.A E.S.P para la generación del material de socialización. Así, el grupo de trabajo queda conformado por las áreas dispuestas en la *Fig 24*.

Figura 25. Estructura del grupo de trabajo para la gestión del riesgo de exposición a PCB's



Fuente: Autor, 2018

Las características de los perfiles de los integrantes del grupo de trabajo debe orientar a que el desempeño del mismo sea transversal, y apoye la meta de comprender, informar, prevenir y sensibilizar a la población respecto al riesgo de exposición a PCB's. Por esto los profesionales que integren este grupo deben tener experiencia en áreas como la salud, toxicología, educación, comunicación, educación, presupuesto y distribución energética, para trabajar de manera interdisciplinaria en la planificación, coordinación, preparación y ejecución de la estrategia de comunicación del riesgo identificado (UNISDR, 2015). Las tareas asignadas a cada área del equipo serán descritas a continuación.

El División HSE en primer lugar tendría la responsabilidad de implementar la metodología de evaluación de riesgo de exposición a PCB's, definir la periodicidad para la implementación de la misma y comunicar a la dirección y partes interesadas los resultados de dicha evaluación, así mismo, coordinaría y asignaría las responsabilidades de los participantes del grupo de trabajo para la estrategia de comunicación del riesgo con base a la interpretación inicial de los resultados obtenidos, además establecería asociaciones estratégicas con autoridades ambientales, juntas de acción comunal, alcaldías locales, empresas colaboradoras, representantes de la comunidad y trabajadores de mantenimiento de transformadores de distribución eléctrica para la socialización del riesgo de exposición a PCB's.

Por otra parte, como parte del control operacional de la estrategia, la División HSE verificaría y aprobaría que las acciones de mejora en el manejo de PCB's queden documentadas y actualizadas en las medidas de manejo ambiental de las empresas colaboradoras, así mismo, realizaría un informe de seguimiento trimestral al cumplimiento de las disposiciones de la Resolución 222 del 2011, en conformidad con la periodicidad del Informe de Desempeño Ambiental generado por esta división.

Operación y Mantenimiento gestionaría el presupuesto de la estrategia de comunicación del riesgo ambiental, ya que dentro de su proceso se encuentra la generación y el manejo ambiental del residuo peligroso en cuestión, de manera transversal, propondría e implementaría acciones de mejora para el manejo de PCB's orientado a la minimización de la exposición de la comunidad y personal de mantenimiento.

La División HSEQ, en representación del área de Salud en el grupo de trabajo, complementaría el análisis de efectos de la metodología para estimar el riesgo a la salud ocasionado gracias a la exposición por inhalación del contaminante con el apoyo de profesionales en toxicología. Además, esta área estaría capacitada para identificar determinantes sociales críticos para la salud y el diseño del contenido del mensaje de comunicación del riesgo asociado a PCB's, en conformidad con los resultados de la metodología de evaluación del riesgo.

Una tarea importante dentro de la División HSEQ sería planificar acciones de prevención y reacción ante la exposición a PCB's en las zonas prioritarias de riesgo, así como los primeros auxilios frente a la exposición del personal del mantenimiento que manipula aceites contaminados con la sustancia de interés. Por último, los profesionales del área capacitarían voceros y harían parte del equipo de difusión del mensaje como profesionales expertos.

El área de comunicaciones claramente tiene un papel fundamental en esta estrategia, ya que orientaría la selección final de canales de información para la difusión del mensaje, diseñaría los elementos visuales de los programas de socialización del riesgo con la comunidad de la zona prioritaria de riesgo y el

equipo trabajadores de mantenimiento, además del ajuste en la presentación del mensaje a ser difundido en los medios electrónicos de Codensa S.A E.S.P. Por otra parte, comunicaciones concertaría espacios de difusión directa del mensaje en espacios públicos de la zona de riesgo prioritaria y planearía el cronograma de dichas actividades.

Finalmente el área estaría encargada de fortalecer la línea de atención a emergencias para atender las inquietudes de la comunidad y los reportes de derrames o fugas de aceite dieléctrico como uno de los principales retos de la efectividad de esta estrategia. En esta misma línea de acción, los contratos asociados a la atención de incidentes y emergencias en la Unidad Operativa de la zona prioritaria de riesgo, realizarían el reporte oportuno de los incidentes y emergencias relacionadas a fugas o derrames de aceite dieléctrico, redireccionado a la División HSE para el control operacional, como valor agregado. Los contratistas propondrían al igual que el área de Operación y Mantenimiento acciones de mejora para la prevención de fugas y derrames de aceite dieléctrico.

El área de jurídica sería un organismo de control en esta estrategia, asegurando la compatibilidad de los marcos normativos existentes relacionados a la gestión ambiental integral de PCB's con la estrategia de comunicación del riesgo, asesorando la relación pública de Codensa S.A. E.S.P con las partes interesadas y realizando la revisión del informe del seguimiento al cumplimiento de las disposiciones de la Resolución 222 del 2011 elaborado por la División HSE.

➤ Lineamiento 2: Análisis del contexto

Cabe recalcar que el contexto de la estrategia de comunicación preliminar del riesgo está dirigida a las localidades de Chapinero, Barrios Unidos y Teusaquillo, el estudio del contexto se hace relevante en la medida que el tipo de información y los medios de socialización debe adaptarse a los modos de la comunidad, utilizando sus propios códigos, en función de sus intereses y de acuerdo con sus conocimientos y creencias. De esa manera, tomarán parte en la adopción de comportamientos y medidas que ayudarán a la prevención y el control del riesgo o de la enfermedad (OPS, 2011).

Teusaquillo, a pesar de pertenecer a la zona nororiente en la zonificación del riesgo, se encuentra ubicada en el centro geográfica de la ciudad, su territorio es completamente urbanizado, cuenta con zonas verdes en sus parques metropolitanos, la Ciudad Universitaria y en algunas avenidas principales, es conocida como la localidad cultural de Bogotá, la población flotante de esta localidad es de aproximadamente 400.000 personas (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2017).

La localidad de Chapinero se encuentra ubicada en el centro oriente geográfico de la ciudad, cuenta con aproximadamente 166000 habitantes y una población flotante de más de 500 000 personas, Chapinero es una de las localidades con mayor expresión de cultural, por lo que ha sido denominada una zona de interés cultural (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2017).

Finalmente, Barrios Unidos a pesar de ser la quinta localidad con menor extensión del distrito, cuenta con una población de 254162 habitantes ubicada en el noroccidente geográfico de la ciudad. A diferencia de las otras localidades presenta una alta oferta de servicios de autopartes, reparación de automotores, manufactura de cuero y marquetaría, sin embargo, comparte la riqueza cultural de las otras dos localidades situadas en la zona prioritaria de riesgo, con expresiones como las fiestas tradicionales del Siete de Agosto, Doce de Octubre y Once de Noviembre, entre otras, por lo que la localidad ha sido definida como clúster económico y cultural (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2018).

Dado que la zona de riesgo es un lugar de confluencia cultural en Bogotá, se esperaría que la interacción con la comunidad sea relativamente directa, por lo que recomienda utilizar diferentes canales para conversar con este tipo de público como encuestas, charlas en línea, centros de llamadas (OPS, 2011). Según las consideraciones de la Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción de Riesgos de Desastres, se propone investigar los mecanismos de diálogo formal e informal con la comunidad (UNISDR, 2015), por lo que aprovechando la infraestructura pública de educación, se sugiere programar conferencias con expertos en salud y representantes de la División de Medio Ambiente Codensa S.A. E.S.P., capacitados para abordar el tema y generar un vínculo con la comunidad.

Los retos de la participación en la comunicación y percepción del riesgo implican la comprensión de principios de la participación que deben ser interpretados para (Orozco, Treviño, & Square, 2012). En este sentido, en la *Tabla 30* se exponen los cuatro principios a los que estos autores hacen referencia y se realiza la interpretación de los mismos para su aplicación en la estrategia de comunicación del riesgo de exposición a PCB's.

Tabla 28. Conceptualización de la participación dentro de estrategia de comunicación del riesgo

Principios de participación	Definición	Interpretación
Cooperación	Son formas estructurales de carácter individual y colectivo tendientes hacia la acción social a través de la ayuda y colaboración, en la búsqueda de satisfactores inmediatos	Lograr mediante la estrategia que la comunidad reporte incidentes y emergencias ambientales relacionadas a la fuga o derrame de aceite dieléctrico de transformador de distribución a través de la línea de emergencia de Codensa S.A E.S.P
Toma de acciones	Es el conjunto de resoluciones y acuerdos concretos, basados en criterios definidos, para alcanzar los objetivos, convenios y resoluciones trazados por la organización	Coordinar el grupo de trabajo para comunicar el riesgo de manera integral al público destinatario con el apoyo de alianzas estratégicas, resaltando la adopción de medidas de minimización del riesgo como parte fundamental de la gestión
Compromiso	Pactos conscientes para lograr metas, intereses y beneficios individuales que intervienen para comprender y analizar los en los grupos de interés que intervienen	Promover dentro de la estrategia de comunicación la asistencia de la comunidad en los espacios de socialización, asegurar que la interacción cuente con el personal capacitado para responder a las inquietudes de las partes interesadas, generando un proceso de retroalimentación continuo para la planificación del mensaje y la selección o modificación de canales de comunicación
Toma de conciencia	Implica la coherencia entre el ser y el hacer	Validar inicialmente la efectividad del mensaje en la comunidad de la zona prioritaria de interés, para identificar oportunidades de mejora en la estrategia de comunicación del riesgo

Fuente: Autor, 2018.

Por lo tanto, los retos identificados corresponden a:

1. Identificar mecanismos para la participación más activa de la comunidad de las zonas de riesgo prioritarias y trabajadores de mantenimiento en temas de preparación para situaciones de emergencia y de conocimiento del riesgo.
2. Coordinación de la División de Medio Ambiente con las áreas del grupo de trabajo para generar un mensaje lo suficientemente robusto para dar alcance a la Resolución 222 del 2011, y satisfacer las necesidades de información de los públicos objetivo.
3. Potenciar el conocimiento del riesgo, la formación e intercambio de redes de conocimiento y una vinculación más estrecha entre tomadores de decisión y quienes generan la información del riesgo para orientar la toma de decisiones (UNISDR, 2015).
4. Buscar mecanismos de seguimiento de la calidad de las medidas de prevención, mitigación, respuesta ante el riesgo de exposición a PCB's, así como la formulación de indicadores para medir el progreso y la efectividad de las acciones implementadas para la comunicación del riesgo.

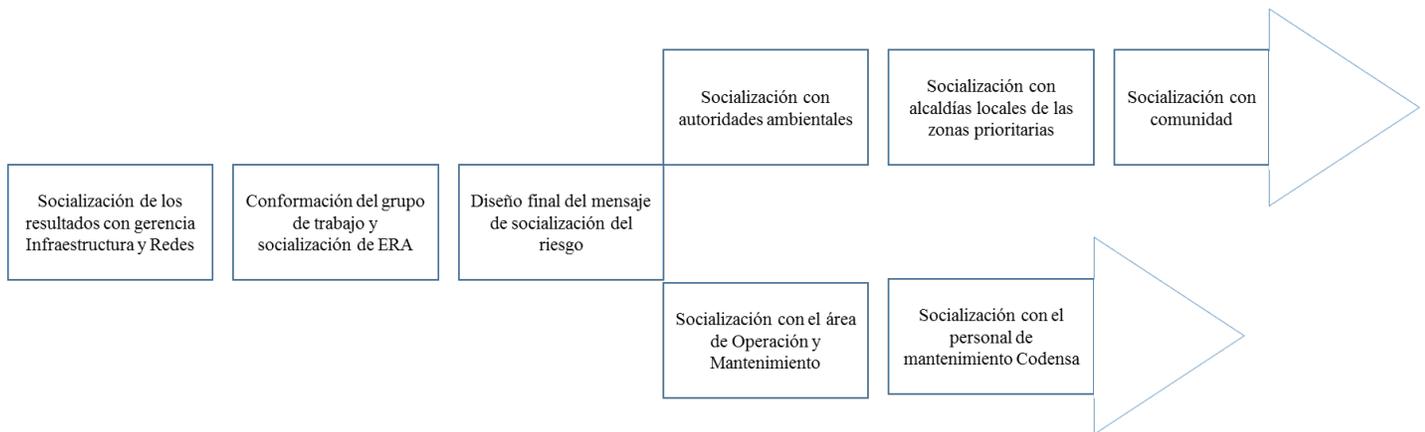
➤ Lineamiento 3: Identificación de los públicos destinatarios

Con base a lo anterior, la dinámica de la población de estas localidades es variable dado el movimiento cultural en la zona, además de zonas residenciales, existe la presencia de establecimientos comerciales, entretenimiento y de servicios, en la localidad Teusaquillo se resalta la influencia de públicos universitarios.

Los estratos socioeconómicos predominantes de esta zona son 3, 4 y 5, aunque la localidad de Chapinero obtiene sectores con población de estrato 2 y 6 (Castillo, 2013), por lo que se podrían esperar diferentes niveles educativos en la población (OPS, 2011), en cuanto a las edades en el último reporte de fichas técnicas por localidades, el 60% de la población de la localidad de Chapinero se distribuye en un rango de edad entre los 15 y 55 años, la localidad de Barrios Unidos y Teusaquillo cuenta con una de las poblaciones mayormente envejecidas (Secretaría de Cultura, Recreación y Deporte, 2008).

Cabe resaltar que el público a quien va dirigida las diferentes actividades, no es únicamente la comunidad expuesta, también incluye el personal de mantenimiento de equipos, autoridades ambientales y la dirección de la organización. Esto amerita la creación de una línea de comunicación del riesgo (OPS, 2011) (*Fig 25*), si bien el cronograma de comunicación externa se direcciona a partir de las necesidades de la zona prioritaria de riesgo de exposición, la socialización de la información se podría realizar de manera paralela con otros grupos de interés, como el grupo de trabajadores dedicados al mantenimiento de transformadores eléctricos de distribución, que corren el riesgo laboral de estar en contacto directo con el contaminante, es importante definir el mensaje para cada grupo de interés, los mecanismos y los responsables.

Figura 26. Línea de comunicación del riesgo de exposición a PCB's



Fuente: Autor, 2018

Es por esto que se requiere la creación de alianzas estratégicas desde el área de coordinación, tanto con las autoridades ambientales, como con representantes de la comunidad, grupos juveniles, juntas de acción comunal, alcaldías locales, representantes de los trabajadores de Codensa S.A E.S.P., y empresas colaboradoras dedicadas al mantenimiento de transformadores eléctricos. Trabajar con participantes directos es clave para el fortalecimiento la estrategia de comunicación del riesgo y la planificación y difusión del mensaje (UNISDR, 2015).

Lo importante en este escenario según la Organización Panamericana de la Salud (2011), es que el mensaje sea claro, dirigido a la población de manera sencilla, transparente, franca, evitando tecnicismos o ilustrando los conceptos más robustos, con las orientaciones y las medidas para hacer frente al impacto en la salud. Los planes de acción son la herramienta para especificar los tiempos, responsables y las actividades de la estrategia de comunicación del riesgo, facilitando la planificación y seguimiento de las actividades relacionadas (UNISDR, 2015).

➤ Lineamiento 4: Planificación de la Respuesta

Teniendo en cuenta los perfiles profesionales del grupo de trabajo de la estrategia, el contexto de la zona de riesgo prioritaria, y el tipo de público esperado en esta área, se identifica que en general la zona en la cual está dirigida la estrategia de riesgo es un lugar de intercambio cultural, cuya población puede tener un nivel educativo de medio a alto, con un rango de edades que tiende a los estadios del adulto mayor

Por esta razón, para la estrategia se debe contar con diferentes canales, para asegurar en cierta medida que el mensaje deseado llegue a la mayor cantidad de población según sus estilos de vida (OPS, 2011), lo importante es que el mensaje sea lo suficientemente claro y homogéneo en todos los medios seleccionados. En este sentido se sugiere que los canales de información deben ser mixtos, ya que en general la población de la zona de riesgo se encuentra en la tercera edad, los procesos socioeconómicos de la zona atraen población flotante con diferentes rangos de edades, resaltando en este punto, la confluencia de jóvenes en la localidad de Teusaquillo dada la actividad universitaria,

Por esto, se establecería un canal de comunicación tradicional, físico, anexando en la factura del servicio de distribución de energía de Codensa S.A. E.S.P, el mensaje diseñado para comunicar el riesgo, por otra parte, aprovechando la infraestructuras públicas universitarias, se ofrecerían charlas o

conferencias para la socialización del riesgo, finalmente, además de la línea de atención de emergencias con la que cuenta Codensa S.A E.S.P, se propondría la apertura de un canal digital en la que la población pueda consultar las preguntas más frecuentes o la información más relevante para la prevención del riesgo de exposición a PCB's, y las actividades que realiza la organización para contribuir al manejo ambiental integral de esta sustancia peligrosa.

En la estrategia de comunicación de la influenza pandémica elaborada por la Organización Panamericana de la Salud, coordinada por la Organización Mundial de la Salud, sugiere planificar la respuesta (OPS, 2013), se definen ciertas acciones para planificar la respuesta, resaltando en la aplicación para la estrategia de comunicación del riesgo de exposición a PCB's las siguientes:

1. Se recomienda que antes de socializar el mensaje con los diferentes grupos de interés se realice un diagnóstico de la percepción del público, el conocimiento del nivel de comprensión, las actitudes y las creencias del público frente al riesgo de exposición a PCB's, permitirán al área de comunicación adaptar el mensaje y los canales de información.
2. Crear mensajes preparativos, es importante, además de comunicar los riesgos asociados a la exposición a PCB's, informar al público de interés las medidas de prevención y respuesta ante el contacto con PCB's, o el avistamiento de fugas o derrames de aceite de transformadores de distribución eléctrica.
3. Elaborar mensajes orientados a los medios de comunicación, teniendo en cuenta las preguntas que puedan plantearse los periodistas y redactores, relacionadas a la gravedad del riesgo, el porcentaje de efectos a la salud de la comunidad y el personal de mantenimiento, y las acciones de prevención, mitigación y minimización del riesgo ambiental asociado a PCB's en transformadores eléctricos de Codensa S.A. E.S.P. Dentro de esta recomendación es necesario planificar cómo se afrontarán y se dará respuesta a los rumores, de la manera más inmediata posible, se sugiere realizar un seguimiento a los medios de comunicación en estos casos para detectar concepciones erróneas y temores infundados en la población.

➤ Lineamiento 5: Elaboración del mensaje

En este proceso es importante identificar qué información se revelará al público y las decisiones sobre los límites de lo que se debe comunicar lo que no es necesario informar. Aunque es importante comunicar los posibles efectos a la salud humana, existe una limitante en la transmisión de esta información cuando la carga emocional de una enfermedad es elevada, como por ejemplo el cáncer (OPS, 2011), en consecuencia, a pesar que se ha demostrado la relación de esta enfermedad con la exposición a PCB's (ASTDR, 2008), no se recomienda informar el riesgo asociado a la enfermedad hasta no adelantar los estudios epidemiológicos pertinentes. El modelo de mensaje de comunicación del riesgo diseñado para la estrategia, teniendo en cuenta los resultados de la implementación de la metodología de evaluación del riesgo y los lineamientos descritos con anterioridad se muestran en la *Figura 26*. El cual podría ser usado bien como folleto, como información difundida en medios electrónicos, poster o anexo en la factura de cobro por servicio de distribución de energía.

Figura 27. Modelo de mensaje para la comunicación del riesgo de exposición a PCB's. Fuente: Autor, 2018

LOS PCB'S

¿QUÉ SON?

Los Bifenilos Policlorados (PCB's) forman un grupo de compuestos químicos sintetizados por el hombre. Se caracterizan por su resistencia al fuego, no conducen la electricidad y NO reaccionan con facilidad con otras sustancias a temperaturas normales.

SITUACIÓN DE RIESGO

LA SITUACIÓN DE RIESGO IDENTIFICADA POR CODENSA S.A E.S.P ES EL DERRAME O FUGA DE ACEITE DIALÉCTRICO CON CONTENIDOS DE PCB'S DE TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS.

¿DÓNDE ESTÁN?

Muchos productos industriales como pinturas, recubrimientos y equipos del sector eléctrico fueron elaborados con PCB's. Unas pocas mezclas de PCB's fueron aditivos populares en el aceite dieléctrico, un fluido aislante usado en TRANSFORMADORES.

¿POR QUÉ SON PELIGROSOS?

Los PCB's difícilmente se degradan, por lo que permanecen y se acumulan en el ambiente. Esta sustancia tiene diferentes grados de toxicidad que afectan la salud humana. A pesar de que están prohibidos, aún existen en Colombia equipos en operación que pueden tener contenidos de PCB's, fabricados antes de esta fecha.

PROHIBIDO EN 1979

¿CÓMO ME EXPONGO?

1. El agua, el suelo o animales entran en contacto con los PCB's.
2. Contacto directo con el personal de mantenimiento de equipos.
3. Inhalación del contaminante por vaporización LENTA a largo plazo.

¿QUÉ POSIBLES EFECTOS PRODUCEN?

- CLORACNÉ
- PROBLEMAS NEUROLÓGICOS
- MENOR PESO EN NIÑOS
- IRRITACIÓN EN LOS OJOS

¿QUÉ HACE CODENSA PARA MINIMIZAR EL RIESGO?

REALIZAMOS EL MARCADO DE EQUIPOS ELÉCTRICOS, SUPERANDO LA META DE MARCACIÓN.

31,7%

JUNTO AL IDEAM REALIZAMOS ANÁLISIS PARA DETERMINAR LA CONCENTRACIÓN DE LOS PCB'S EN EL ACEITE DE LOS TRANSFORMADORES.

SOMOS UNA DE LAS EMPRESAS PIONERAS EN LA DESCONTAMINACIÓN DE ACEITE MEDIANTE LA TÉCNICA DE DECLONIZACIÓN EN COLOMBIA

CONTAMOS CON CONTROLES OPERACIONALES PARA LA ATENCIÓN DE DERRAMES Y FUGAS, CON PERSONAL CAPACITADO PARA ACTUAR CON EL EQUIPO DE PROTECCIÓN NECESARIOS.

REALIZAMOS LA EVALUACIÓN DEL RIESGO AMBIENTAL LA ZONA URBANA DE BOGOTÁ DETERMINANDO LAS ÁREAS PRIORITARIAS DE ACCIÓN.

¿QUÉ PUEDO HACER YO?

COMUNICÁTE CON LA LÍNEA DE ATENCIÓN 7 115 115 O CON LA LÍNEA DE EMERGENCIA 115 PARA REPORTAR FUGAS O DERRAMES DE ACEITE EN LOS TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN DE CODENSA.

Cabe resaltar que la estrategia de comunicación del riesgo debería ser evaluada durante y después de la implementación de la misma como medida de retroalimentación para la corrección y adaptación de la misma (UNISDR, 2015). En este sentido, para conocer el nivel de comprensión del mensaje, se plantean encuestas presenciales y en redes sociales, tests virtuales como adición para los usuarios que reciben la factura electrónica, así como códigos QR en las comunicaciones físicas que redireccionarían al test de evaluación del mensaje, por último se propone también la implementación de un buzón de sugerencias y comentarios en la página web de Codensa S.A E.S.P en la misma sección correspondiente a la comunicación del riesgo asociado a PCB's para conocer la reacción de los clientes.

Para tener una idea acerca del posible éxito de la estrategia, se pueden analizar los resultados obtenidos de estrategias formuladas a partir de los mismos lineamientos consignados en la *Guía para la Elaboración de la Estrategia de Comunicación del Riesgo, de la Teoría a la Acción*, elaborada por la Organización Panamericana de la Salud, (2011), como la estrategia de comunicación en salud y de riesgo en el manejo del virus del Chikungunya y otras enfermedades transmitidas por el mismo vector. En esta estrategia se concluyó que las contribuciones del uso de campañas de comunicación masiva y el manejo de los medios no alcanzan el mismo impacto si no se desarrollan procesos de movilización social consistentes, que involucren la participación efectiva de distintos actores (Casanova, Vega, & Arroyave, 2016). Por esto en la postulación de lineamientos se propone la difusión del mensaje de manera virtual pero también en espacios de discusión y contacto directo con la comunidad.

Finalmente, otra lección aprendida es la designación de una sola fuente oficial para la entrega de información como estrategia para mantener un flujo efectivo de comunicación entre entidades públicas, de salud y medios, este fue un factor que falló en dicha estrategia, favoreciendo la difusión de mitos y creencias que afectaron la percepción del riesgo (Casanova, Vega, & Arroyave, 2016). Por lo anterior se propuso en la estrategia de comunicación del riesgo de PCB's que los mensajes fuesen homogéneos, pero también la preparación ante la respuesta de los medios comunicación, resaltando en este punto el mantenimiento de una sola fuente oficial para evitar los percances del caso de estudio.

8. Conclusiones

En el presente estudio se diseñó una metodología de evaluación del riesgo de exposición por inhalación de la mezcla comercial de bifenilos policlorados (PCB) Aroclor 1260, producto de la materialización de los escenarios de riesgo identificados, a saber; derrame masivo, derrame, o fuga de aceite dieléctrico en transformadores de distribución instalados en el perímetro urbano de Bogotá, Colombia, por la empresa de energía Codensa S.A. E.S.P, que es la mayor distribuidora del país colombiano, con una participación del 24% del mercado nacional de energía (Codensa, 2015).

La estructura fundamental de la metodología está basada en los lineamientos establecidos por el Manual de Evaluación y Gestión del Riesgo Asociado a los COP del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia (Dirección Desarrollo Sectorial Sostenible, 2007), inspirada en los principios tradicionales de la EPA (1992). En este marco, fue posible correlacionar de manera clara y evidente las variables fisicoquímicas de una mezcla específica de PCB's y los criterios de evaluación del riesgo ambiental, en el sentido que se planteó y aplicó un modelo fisicoquímico del comportamiento del Aroclor 1260 para determinar el alcance espacial del riesgo en el área estudio, durante una de las etapas finales de la evaluación del riesgo, denominada cuantificación del riesgo.

Por otra parte, los escenarios de riesgos postulados gracias a la implementación de la metodología de evaluación del riesgo fundamentaron algunas definiciones de las condiciones del sistema fisicoquímico a evaluar en el modelo, como por ejemplo la selección de las matrices de transferencia del contaminante desde una fase líquida (aceite) a una fase gaseosa (atmósfera), lo que demuestra la sinergia entre los criterios de evaluación y el planteamiento del modelo fisicoquímico.

Ahora bien, el desarrollo del modelo fisicoquímico planteado en este estudio consistió en la adaptación del modelo Venier & Hites, (2010) para la predicción de la presión parcial del sistema de estudio, esta variable fue seleccionada debido que es un indicador de la variación de la concentración del contaminante en dos fases de interés (Laidler & Meiser, 2013), dando cuenta de la transferencia de PCB's a la atmósfera mediante el fenómeno de volatilización, la cual fundamenta la exposición del contaminante por inhalación (Dobson & Van Esch, 1993), siendo este último el riesgo ambiental evaluado en la metodología presentada en este estudio.

De esta forma se logró relacionar las variables fisicoquímicas temperatura, velocidad del viento, dirección del viento y difusividad del Aroclor 1260, en un modelo de regresión no lineal multivariable para predecir la presión parcial atmosférica del PCB de interés, asociada a la concentración del Aroclor 1260 mediante la Ley de Raoult. Dicha concentración de PCB's fue obtenida de la información reportada para la muestra de 10381 transformadores de distribución inventariados por la organización.

Se estableció que el modelo fisicoquímico muestra un límite de confianza dados los valores alcanzados por las incertidumbres de los parámetros independientes, demostrando así la validez estadística de la estimación, a pesar de que el modelo presenta un coeficiente de correlación de 0,4532. De este modo, se demostró la existencia de la relación entre la variable dependiente (presión) y las variables independientes fisicoquímicas del sistema estudiado, concluyendo que el área de exposición no aumenta necesariamente con la concentración de Aroclor 1260 en el aceite dieléctrico de transformadores, por lo que se deduce que las variables fisicoquímicas juegan un papel fundamental en la distribución del contaminante.

La ventaja de este modelo radica precisamente en que permite la estimación de la distribución del contaminante en un tiempo definido, a partir de la derivación parcial de la regresión en función de la difusividad, siguiendo el principio de la segunda Ley de Fick. De este modo, se pudo estimar el área de impacto del riesgo, y, por ende, la distancia del alcance de la exposición a PCB's ocasionada por un derrame o fuga de aceite dieléctrico, valor que está dado en un rango de 49 a 577 metros de distancia desde la fuente de exposición. Así, se establecieron dos niveles en el alcance del riesgo; extenso cuando la distancia de exposición es superior a 200m y localizada cuando es menor que esta.

La influencia del alcance de exposición mencionado en las siete zonas de riesgo generadas mediante el análisis geoestadístico de los sitios de riesgo definidos en la Resolución 222 de 2011 (MADS, 2011), permitió la caracterización del riesgo en función de la extensión del mismo en cuatro categorías: riesgo alto, medio, moderado y bajo, concluyendo que la zona prioritaria para la gestión del riesgo en el perímetro urbano de Bogotá es la zona nororiente de Bogotá, comprendida por las localidades de Barrios Unidos, Chapinero y Teusaquillo, seguida de las zonas suroriente, correspondiente a las localidades de Usme y San Cristobal, y la zona sur en las localidades de Ciudad Bolívar, Tunjuelito y Rafael Uribe Uribe. Por otra parte, las zonas menos expuestas o con menor prioridad de riesgo son la zona norte, en la mayor proporción de las localidades de Suba y Usaquén, y la zona centro, correspondiente a las localidades de Los Mártires, Santa Fé y Candelaria.

Esto constituye un aporte destacable al modelamiento del comportamiento del transporte del contaminante, sobre todo cuando el sistema muestra concentraciones bajas de Aroclor 1260. Tanto así que este estudio representaría el primer ejercicio académico de la aproximación semicuantitativa del riesgo de exposición por inhalación de PCB's en el contexto de la actividad productiva de distribución de energía en Colombia. En consecuencia, el resultado del modelo fisicoquímico y la evaluación del riesgo ambiental en conjunto, consolidaron la delimitación de las zonas de riesgo prioritarias de exposición al Aroclor 1260, y constituyeron el fundamento para la postulación de los lineamientos para la formulación de la estrategia de comunicación del riesgo asociado a este contaminante.

Como se mencionó anteriormente, los lineamientos iniciales de la estrategia de comunicación del riesgo de exposición a PCB's fueron propuestos con base en los resultados de la delimitación de zonas de riesgo prioritarias. Esta delimitación está asociada a la localización del riesgo en el perímetro urbano de Bogotá, por lo que las condiciones socioeconómicas de la población establecida en dichas zonas fundamentan la dirección de la estrategia. Las condiciones mencionadas fueron analizadas para generar 5 lineamientos de la estrategia de comunicación, según estrategias definidas (OPS, 2013), (OPS, 2011), (UNISDR, 2015), gracias a la definición de condiciones técnicas y operativas del grupo de trabajo de la estrategia y al análisis de las condiciones socioeconómico, nivel de educación, edades, modos de vida y las actividades productivas características de las localidades de Chapinero, Barrios Unidos y Teusaquillo. Teniendo en cuenta que esta es una zona de confluencia cultural en la capital colombiana, se seleccionaron medios de difusión físicos y electrónicos para la comunicar el riesgo asociado a PCB's, con un mensaje claro y sencillo, teniendo en cuenta la diversidad de público a la que puede llegar el mensaje. Las distribuciones de edades de estas localidades mostraron la predominancia de habitantes de la tercera edad, por lo que un método tradicional de información físico fue diseñado en primera instancia, mediante un modelo de mensaje para ser entregado como anexo en el recibo de cobro del servicio de la prestación del servicio de distribución de energía.

9. Recomendaciones

En primer lugar, los resultados de este diseño metodológico invitan a la aplicación de esta metodología de evaluación de riesgo en otros municipios influenciados por la actividad de distribución de energía de Codensa S.A E.S.P., así como también en otros sectores productivos que empleen equipos eléctricos en su actividad económica, como el sector minero (Dirección General de Calidad Ambiental. Ministerio del Ambiente de Perú, 2016). Es importante resaltar que este documento configura una guía para la evaluación de la exposición de PCB's de manera semicuantitativa, con un impacto positivo en el direccionamiento de las decisiones relacionadas a la gestión del riesgo, incluyendo la identificación de zonas prioritarias para la comunicación del mismo.

Se sugiere para el ajuste del modelo, la inclusión de la variable población en el área de estudio, la cual podría aportar el mayor porcentaje del ajuste de la variación de los datos según (Viener & Hites, 2010), para este fin valdría la pena desarrollar un modelo demográfico que permitiera realizar la estimación de este parámetro a una distancia determinada de los transformadores de distribución eléctrica.

También sería interesante que, en un posible escenario de rediseño, teniendo en cuenta la población, se ajustara en el modelo un cociente que relacionara la difusividad y la dirección del viento de la forma D/\vec{V} , para que, al establecer la distancia del alcance del riesgo, no sólo se estime la magnitud sino la dirección en la cual se distribuye el contaminante, siguiendo el principio de la segunda Ley de Fick. Se podría proponer además el cálculo de las variables ambientales de manera estacionaria cuando alcanzan sus mayores y menores picos, para evaluar la variabilidad del modelo y comparar los resultados obtenidos en la extensión del riesgo. Una actividad final tendiente al mejoramiento del ajuste del modelo es la definición de la incertidumbre del cálculo, en relación con las variables obtenidas por medio de interpolación geoestadísticas, para determinar el rango estadísticamente válido en el cual se puede predecir la presión parcial del sistema estudiado.

Para el análisis de los resultados del modelo fisicoquímico, de cara a la estimación de la exposición de la población al contaminante, se propone interpolar geoestadísticamente el riesgo calculado en el perímetro urbano de Bogotá para obtener una capa de distribución continua del riesgo en el área de estudio, una vez obtenida esta información, se sugeriría realizar la superposición de dicha información con la capa de densidad poblacional disponible en la Secretaría Distrital de Ambiente, para el establecimiento de zonas de riesgo con un criterio demográfico y compararlas con las zonas de riesgo definidas en función de los sitios de interés establecidos en la Resolución 222 de 2011.

Vale la pena resaltar que la precisión del modelo depende de la calidad de la información reportada en el Inventario Nacional de PCB's por parte de la organización, ya que esta es la fuente primaria de los datos de ubicación geográfica y concentración de PCB's en aceite dieléctrico. La ejecución del registro debe ser tal que permita realizar la trazabilidad de los datos, evitando a toda costa el registro de duplicados o datos erróneos por fallos de digitación. Para finalizar, se recomienda la implementación de la estrategia de comunicación en la zona prioritaria de riesgo nororiente, para la posterior validación de la misma, esto con el objetivo de identificar oportunidades de mejora en la proposición de los lineamientos iniciales y la adaptación de las herramientas de comunicación a las necesidades de la población de interés.

Referencias

- Astudillo, M. (2014). *Gestión de los Transformadores Eléctricos con Bifenilos Policlorados de la Empresa CENTROSUR*. Ecuador: Universidad de Cuenca.
- Posada, E., & Aguirre, J. (2006). *Purificación de Aceites Aislantes Contaminados con Bifenilos Policlorados (PCB's)*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Andino, P. (2013). *Plan de Acción para el Manejo de Desechos Peligrosos con Énfasis en Bifenilos Policlorados (PCB's) en la Empresa Eléctrica de Quito*. Quito: Universidad Internacional de SEK.
- Duff & Phelps de Colombia. (2006). *Codensa S.A. E.S.P.* Bogotá: Sociedad Calificadora de Valores.
- INE. (2003). La Evaluación del Riesgo Ambiental. En I. N. Ecología, *Introducción al Análisis de Riesgos Ambientales* (págs. 63-79). México D.F: Secretaría de Medio Ambiental y Recurso Natural.
- OPS. (1999). *Metodología de Identificación y Evaluación de Riesgos para la Salud en Sitios Contaminados*. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. Lima: Organización Mundial de la Salud.
- I&N Enel. (2017). *Instructivo Operacional No.598*. Bogotá: Grupo Enel.
- Hurtado, L. (2006). Modelamiento Teórico y Modelamiento Empírico de Procesos: una síntesis. *Scientia et Technica* (31), 103-104.
- OPS. (2011). *Guía para la Elaboración de la Estrategia de Comunicación del Riesgo, de la Teoría a la Acción*. Quebec: Canadian International Development Agency.
- Valero, S., & Tusso, J. (2017). *Exposición a Bifenilos Policlorado: Efecto en la salud y en ambiente: Revisión de la Literatura, 2000 a 2017*. Bogotá: Universidad El Rosario.
- Gía, J., & Frías, M. (2017). *Descomposición del Bifenilo Policlorado (PCB) Aroclor 1260 en Aceites Dieléctricos, por Radiólisis del Agua, inducida por Radiación Gamma del Isótopo de Cobalto 60*. Quito: Universidad Central de Ecuador.
- Vaca, M., García, C., & Juan, G. (2013). *Cuantificación de Existencias de Compuestos Bifenilos Policlorados (PCB) en Colombia*. Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Codensa. (2016). *Informe Nacional de Avance en las Metas de Identificación, Mercado, Retiro de Uso, y Eliminación de PCB EN Colombia 2014/2015*. Bogotá: Enel S.A.
- Ritter, L., Solomon, K., Forget, J., Stemeroff, M., & Leary, C. (1995). *Informe de evaluación sobre: DDT, aldrina, dieldrina, endrina, clordano, heptacloro, hexaclorobenceno, mirex, toxafeno, bifenilos policlorados, dioxinas y furanos*. Guelph: Programa Internacional de Seguridad de las Sustancias Químicas (IPCS).
- Diefenbacher, P., Gerecke, A., Bogdal, C., & Hungerbühler, K. (2016). Spatial Distribution of Atmospheric PCBs in Zurich, Switzerland: Do Joint Sealants Still Matter? *Environmental Science and Technology*, 50 (1), 232-239.
- COEPA. (2007). *El Riesgo Ambiental: Guía de Gerencia de Riesgos Ambientales*. Provincia de Alicante: Confederación Empresarial de la Provincia de Alicante.
- INS. (2018). *Factores de Riesgo Ambiental*. Bogotá: Instituto Nacional de Salud.
- NAS. (1983). *Risk Assessment in the Federal Government: Managing the*. Washington D.C: National Academy of Sciences.
- EPA. (1992). *Framework for Ecological Risk Assessment*. Washington: Environmental Protection Agency of United States.

McKay, D. (2001). *Multimedia Environmental Models: The Fugacity Approach* (Segunda ed.). Washington, D.C: Lewis Publishers.

Baird, C. (2004). *Química Ambiental*. Barcelona: Editorial Reverté S.A.

Ilyina, T. (2007). *The Fate of Persistent of Organic Pollutants in the North Sea*. Honolulu: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Marhavilas, P., Koulouriotis, D., Gemini, & V. (2011). Risk analysis and assessment methodologies in the work sites: On a review, classification and comparative study of the scientific literature of the period 2000-2009. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* , 477 -523.

PNUMA. (2002). *Transformadores y condensadores con PCB: desde la gestión hasta la reclasificación y eliminación*. Suiza: Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.

Dirección Desarrollo Sectorial Sostenible. (2007). *Manual de Evaluación y Gestión del Riesgo Asociados a los COP*. Bogotá: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

Marhavilas, P., Koulouriotis, D., & Gemini, V. (2011). Risk analysis and assessment methodologies in the work sites: On a review, classification and comparative study of the scientific literature of the period 2000-2009. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* , 477 -523.

Porta, M., Puigdomenech, E., Ballester, F., Selva, J., Ribas-Fitó, N., Dominguez-Boada, L., y otros. (2008). Estudios realizados en España sobre concentraciones en humanos de compuestos tóxicos persistentes. *Gaceta Sanitaria* , 22, 248-266.

Fundación Vasca para la Seguridad Alimentaria. (2005). *¿Qué es la Evaluación del Riesgo?* País Vasco: Elika.

ILSI. (2012). *Guía para la Evaluación del Riesgo Ambiental de Organismos Genéticamente Modificados*. Sao Paulo: International Life Science Institute.

ASTDR. (2016). *ToxFAQs™ - Bifenilos policlorados (BPCs) [Polychlorinated Biphenyls (PCBs)]*. Atlanta: Agencia para Sustancias Peligrosas y Registro de Enfermedades.

Hydro-Quebec Research Institute. (1988). *Hazards, Decontamination and Replacement of PCB, a Comprehensive Guide*. (J.-P. Crine, Ed.) New York: Plenum Press, New York.

Dirección de Desarrollo Sectorial Sostenible. (2007). *Gestión Integral de Residuos o Desechos Peligrosos: Bases Conceptuales*. Bogotá: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

Martinez, J. (2005). *Guía para la Gestión de Residuos Peligrosos: Fundamentos* (Vol. I). Montevideo: Centro Coordinador del Convenio de Basilea para América Latina y El Caribe.

Avelino, P. (2001). *Transformadores de Distribución: Teoría, Cálculo y Pruebas* (Segunda ed.). México D.F: Reverté Ediciones S.A.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2011). *Resolución 222 de 2011*. Bogotá: Diario Oficial No. 48.291 .

OMS. (1976). *Toxicological Abbreviations Polychlorinated Biphenyls and Terphenyls*. Geneva: Programa Internacional de Seguridad Química.

Organización Panamericana de la Salud. (2006). *Evaluación de Riesgos*. Washington: Biblioteca Virtual de Desarrollo Sostenible y Salud Ambiental.

TTE. (21 de Febrero de 2017). *Transformadores de Distribución*. Obtenido de Servicios y Productos: <http://www.ttesa.com.ar/transformadoresd.php>

MAGNETRON. (2018). *Transformador de Distribución Convencional*. Pereira: MAGNETRON.

Andrews, N. (1 de Febrero de 2018). *Partes de un Transformador*. Recuperado el 12 de Abril de 2018, de Geniolandia: <https://www.geniolandia.com/13147454/partes-de-un-transformador-de-distribucion>

Lopera, E., & Aguirre, C. (2006). *Purificación de Aceitres Aislantes Contaminados con Bifenilos Policlorados (PCB's)*. Bogotá: Universidad Nacional.

Engel, T., & Reid, P. (2007). *Introducción a la Fisicoquímica: Termodinámica*. Mexico D.F: Prentice Hall México.

- Finizio, A., Mackay, D., Bidelmang, T., & Harner, T. (1997). OCTANOL-AIR PARTITION COEFFICIENT AS A PREDICTOR OF PARTITIONING OF SEMI-VOLATILE ORGANIC CHEMICALS TO AEROSOLS. *Atmospheric Environment*, 31 (15), 2289-2296.
- IDEAM. (2014). *Inventario de Compuestos Bifenilos Policlorados (PCB's)*. Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- Torres, K. (17 de Marzo de 2018). Intervención Corporación Autónoma Regional. *La Autoridad Ambiental Regional y los PCB's: CAR*. Bogotá, Cundinamarca, Colombia: Seminario Divulgación de la Experiencia en Colombia en el Tratamiento de Aceite y Descontaminación de Transformadores con Contenidos de PCB's.
- ASTDR. (14 de febrero de 2008). Evaluación toxicológica y de vías de exposición. Atlanta, Buford, Estados Unidos: Agencia para Sustancias tóxicas y el Registro de Enfermedades. Recuperado el 10 de Abril de 2018, de https://www.atsdr.cdc.gov/es/training/pha_professional2/module3/sv5.html
- AENOR. (2008). *UNE 150008:2008*. Madrid: AENOR - Asociación Española de Normalización y Certificación.
- Codensa. (2015). *Conoce Codensa*. Bogotá: Enel S.A.
- TREDI. (2018). Experiencia Internacional del Tratamiento y Eliminación de PCB's. *DE ACEITE Y DESCONTAMINACIÓN DE TRANSFORMADORES CON CONTENIDOS DE PCB* (pág. 13). Bogotá: TREDI.
- MADS. (22 de Diciembre de 2011). *Resolución 222 de 2011*. Recuperado el 12 de Febrero de 2018, de Diario Oficial No. 48.291 de 22 de diciembre de 2011: https://www.icbf.gov.co/cargues/avance/docs/resolucion_minambienteds_0222_2011.htm
- Pinzón, F. (17 de Marzo de 2018). Proyecto PCB en Colombia: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. *Resultados del Proyecto Nacional para la Gestión y Eliminación de PCB's en Colombia*. Bogotá, Cundinamarca, Colombia: Seminario Divulgación de la Experiencia en Colombia en el Tratamiento de Aceite y Descontaminación de Transformadores con Contenidos de PCB's.
- Codensa. (2017). *Grupo Enel*. Bogotá: Enel S.A.
- HSEQ. (2017). *Instructivo Operacional No.598*. Bogotá: Grupo Enel.
- Diaz, F. (2000). *Metodología de Identificación y Evaluación de Riesgos para la Salud en Sitios Contaminados*. San Luis Potosí: BIOREM - Bioremediation of contaminated sites.
- Guaiteiro, L. (2010). *Propuesta Metodológica para la Evaluación de Riesgo Ambiental Causado por el Uso de Plaguicidas en Sistemas Hortofrutícolas de la Sabana de Bogotá*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Dirección General de Calidad Ambiental. Ministerio del Ambiente de Perú. (2016). *Procedimiento de manejo de PCB durante el mantenimiento de equipos* (Primera ed.). Lima: Agencia MAS IDEAS S.A.C.
- Dirección General de Calidad Ambiental. Ministerio del Ambiente de Perú. (2016). *Procedimiento de manejo de PCB durante el mantenimiento de equipos* (Primera ed.). Lima: Agencia MAS IDEAS S.A.C.
- Melko, A., Ievins, J., & Roja, Z. (2012). *Methods of the Environmental Risk Analysis and Assessment, the Modified Method of the Risk Index*. Warsaw: Safety of Technogenic Environment.
- Dobson, S., & Van Esch, G. (1993). *Environmental Health Criteria 140: Polychlorinated Biphenyls and Terphenyls*. International Programme on Chemical Safety. Genova: Organización Mundial de la Salud.
- Ruiz, G. (2005). Biodegradación de Bifenilos Policlorados por Microorganismos. *Acta Universitaria*, 15 (2).

Venier, M., & Hites, R. (2010). Regression Model of Partial Pressures of PCBs, PAHs, and Organochlorine Pesticides in the Great Lakes' Atmosphere. *Environmental Science & Technology*, 44, 618–623.

EPA. (1998). *Guidelines for Ecological Risk Assessment*. Washington: Environmental Protection Agency of United States.

Secretaría Distrital de Planeación de Bogotá. (2014). *Proyecciones de población por localidades para Bogotá 2016-2020*. Bogotá: Bogotá Ciudad de Estadísticas Boletín 69.

UAECD. (16 de Febrero de 2017). *Sitios de Interés*. (U. A. Catastro, Ed.) Recuperado el 14 de Marzo de 2018, de Infraestructura de Datos Espaciales del Distrito Capital: <https://www.ideca.gov.co/es/proyectos/proyectos-geograficos-distrito/portal-de-mapas-de-bogota>

RM CAB. (2016). *Informe Anual de Calidad del Aire de Bogotá 2016*. Bogotá: Secretaría Distrital de Ambiente.

Secretaría General de Bogotá. (2012). *Información general de Bogotá*. Bogotá: Sitio Web oficial de la Alcaldía Mayor de Bogotá.

Secretaría General de Bogotá. (2017). *Ubicación de la Ciudad*. Bogotá: Sitio Web Oficial de Alcaldía Mayor de Bogotá.

Secretaría Distrital de Planeación. (2016). *Proyecciones de Población 2016-2020*. Bogotá: Dirección de Estudios Macro-SDP.

Secretaría Distrital de Salud. (. de . de 2014-2017). *Documentos técnicos e investigaciones*. Recuperado el 18 de Marzo de 2018, de Observatorio de Salud Ambiental: <http://biblioteca.saludcapital.gov.co/ambiental/index.shtml?s=w&m=h&doc=7436&nocache=1>

I&N Enel. (2017). *Instructivo Operacional no. IO 1160*. Bogotá: Grupo Enel.

I&N Enel. (2017). *Instructivo Operacional no. 868*. Bogotá: Grupo Enel.

Tariq Jan, S., Afzal, R., & Zia Khan, A. (2015). *Transformer Failures, Causes & Impact*. Bali: International Conference Data Mining, Civil and Mechanical Engineering.

HSE. (2018). *Control de Registros 2018*. Bogotá: División Seguridad y Medio Ambiente.

HSE. (2018). *Registro de Fugas 2018*. Bogotá: División HSE.

HSE. (2017). *Propuesta para la Minimización de Riesgos de Contaminación por PCB*. Bogotá: División HSE.

ASTDR. (2000). *Toxicological Profiles Chemical and Physical Information*. Atlanta: Agency for Toxic Substances and Disease Registry.

TRANSEQUIPOS. (17 de Marzo de 2018). Intervención TRANSEQUIPOS. *Pruebas de Laboratorio para Análisis de PCB's*. Bogotá, Cundinamarca, Colombia: Seminario Divulgación de la Experiencia en Colombia en el Tratamiento de Aceite y Descontaminación de Transformadores con Contenidos de PCB's.

Harner, T., & Jones, K. (1995). Model of Long Term Exchange of PCB's between Soil and the Atmosphere in the Southern U.K. *Environmental Science and Technology*, 29, 1200-1209.

Laidler, K., & Meiser, J. (2013). *FISICOQUÍMICA*. Bogotá: Difusora Larousse de Colombia Ltda.

Totten, L., Stenchikov, G., Gigliotti, C., Lahoti, N., & Eisenreich, S. (2006). Measurement and Modeling of urban atmospheric PCB concentration on a small (8km) spatial scale. *Atmospheric Environment*, 7940-7952.

UNCOR. (2010). *Aceites Minerales Aislantes Nuevos para Transformadores y Equipamiento de Maniobra*. Universidad Nacional de Córdoba. Córdoba: Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

EDP HC ENERGÍA. (2018). *Especificación técnica ET/5103*. España: Hidrocantábrico Distribución Eléctrica, S.A.U.

REPSOL. (2015). *Aceites dieléctricos*. Madrid: Repsol Lubricantes y Especialidades S.A.

INECC. (2017). *Datos de Identificación Aceite mineral: Aceite mineral parafínico*. México D.F: Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático de México.

NCBI. (1992). *Compound Summary for CID 38018*. National Center for Biotechnology Information. Washington D.C: Open Chemistry Database.

Arcgis for Desktop. (2017). *Vista general del conjunto de herramientas Interpolación*. California: esri.

ArcGis for Desktop. (31 de Enero de 2016). *Mascara (Configuración del Entorno)*. (esri, Editor) Recuperado el 21 de Marzo de 2018, de Arcmap: <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/environments/mask.htm>

ArcGis for Desktop. (21 de Enero de 2016). *Zonal statistics as table*. (esri, Editor) Recuperado el 22 de Marzo de 2018, de Arcmap: <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/zonal-statistics-as-table.htm>

ArGis for Desktop. (12 de Febrero de 2018). *Cómo funciona Kriging*. Recuperado el 22 de Marzo de 2018, de Arcmap: <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/tool-reference/3d-analyst/how-kriging-works.htm>

Arcgis for Desktop. (2017). *Intersecar*. California: esri.

R. (17 de Abril de 2018). *The R Project for Statistical Computing*. Obtenido de Manuals: <https://www.r-project.org/about.html>

Kabacoff, Robert. (10 de Septiembre de 2017). *Quick R*. Recuperado el 16 de Abril de 2018, de Cluster Analysis: <https://www.statmethods.net/advstats/cluster.html>

Troisi, G., Haraguchi, K., Kaydoo, D., Nyman, M., Aguilar, A., Borrell, A., y otros. (2001). Bioaccumulation of polychlorinated biphenyls (PCBs) and dichlorodiphenylethane (DDE) methyl sulfones in tissues of seal and dolphin morbillivirus epizootic victims. *J Toxicol Environ Health A* , 62 (8), 1-8.

ONU. (2017). *PROYECTO “MANEJO Y DISPOSICIÓN AMBIENTALMENTE RACIONAL DE BIFENILOS POLICLORADOS”*. Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial – ONUDI. Lima: Ministerio de Salud – República de Perú, Dirección General de Salud Ambiental e Inocuidad Alimentaria – DIGESA.

International Agency for Research on Cancer. (2016). *POLYCHLORINATED BIPHENYLS AND POLYBROMINATED BIPHENYLS* (Vol. 107). Lyon, , Francia: Organización Mundial de la Salud.

CODENSA. (2018). Experiencia Internacional del Tratamiento y Eliminación de PCB's. *DE ACEITE Y DESCONTAMINACIÓN DE TRANSFORMADORES CON CONTENIDOS DE PCB* (pág. 13). Bogotá: TREDI.

Codensa. (2015). *¿En qué regiones del país tiene presencia Codensa?* Bogotá: Enel S.A.

Alcaldía Mayor de Bogotá. (16 de septiembre de 2017). *Localidad Teusaquillo*. Obtenido de Localidades: <http://bogota.gov.co/localidades/Teusaquillo>

Alcaldía Mayor de Bogotá. (16 de septiembre de 2017). *Localidad de Chapinero*. Obtenido de Localidades: <http://bogota.gov.co/localidades/Chapinero>

Alcaldía Mayor de Bogotá. (17 de Septiembre de 2018). *Localidad Barrios Unidos*. Obtenido de Localidades: <http://bogota.gov.co/localidades/barrios-unidos>

Castillo, Á. (2013). *DINÁMICA DE LA CONSTRUCCIÓN POR USOS*. Bogotá: Unidad Administrativa Especial de Catastros.

Secretaría de Cultura, Recreación y Deporte. (2008). *Fichas Técnicas Básicas*. Bogotá: Observatorio de Culturas.

Naula, K. (2015). *Determinación cuantitativa de arocloros de bifenilos policlorados en aceites dieléctricos*. Guayaquil: Escuela Superior Politécnica del Litoral.

ISO. (2018). *ISO 31000:2018 Risk Management Guidelines*. Ginebra: International Organization of Standardization.

Lang, S., Mayer, P., Hursthouse, A., Kotke, D., Hand, I., Schulz-Bull, D., y otros. (2018). Assessing PCB pollution in the Baltic Sea - An equilibrium partitioning based study. *Chemosphere* , 191, 886-894.

Hou, S., Li, C., Xi, B., Yu, Z., Yeager, K., & Wu, F. (2017). Historical record of polychlorinated biphenyls (PCBs) and special occurrence of PCB 209 in a shallow fresh-water lake from eastern China. *Chemosphere* , 832-840.

Wang, D., Wang, Y., Singh, V., Zhu, J., Jiang, L., Zeng, D., y otros. (2017). Ecological and health risk assessment of PAHs, OCPs, and PCBs in Taihu Lake basin. *Ecological Indicators* , in press.

Grech, A., Brochot, C., Dorne, J.-L., Quignot, N., Bois, F., & Beaudouin, R. (2017). Toxicokinetic models and related tools in environmental risk assessment of chemicals. *Science of the Total Environment* , 578, 1-15.

Cortés, J., Cobo, M., Gonzales, C., Gómez, C., Abalos, M., & Aristizabal, B. (2016). Environmental variation of PCDD/Fs and dl-PCBs in two tropical Andean Colombian cities using passive samplers. *Science of the Total Environment* , 568, 614-623.

Cui, S., Qiang, F., Guo, L., Li, Y.-F., Li, T.-x., Ma, W.-l., y otros. (2016). Spatial-temporal variation, possible source and ecological risk of PCBs in sediments from Songhua River, China: Effects of PCB elimination policy and reverse management framework. *Marine Pollution Bulletin* , 106, 109-118.

Congreso de la República. (1979). *Ley 9 de 1979*. Bogotá: República de Colombia - Gobierno Nacional.

Congreso de la República. (1996). *Ley 253 de 1996*. Bogotá: República de Colombia- Gobierno Nacional.

Congreso de la República. (2005). *Ley 994 de 2005*. Bogotá: República de Colombia- Gobierno Nacional.

Congreso de La República. (1993). *Ley 99 de 1993*. Bogotá: República de Colombia- Gobierno Nacional.

Congreso de La República. (2008). *Ley 1196 de 2008*. Bogotá: República de Colombia- Gobierno Nacional.

Congreso de La República. (2012). *Ley 1253 de 2012*. Bogotá: República de Colombia- Gobierno Nacional.

Presidente de Colombia. (2015). *Decreto Único Reglamentario 1076 de 2015*. Bogotá: Juan Manuel Santos Calderón -Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2016). *Resolución 1741 de 2016*. Bogotá: Diario Oficial No. 50.038.

Ministerio de Ambiente. Vivienda y Desarrollo Territorial. (2018). *Política para la Gestión Integral de Residuos Peligrosos*. Bogotá: Dirección de Desarrollo Sectorial Sostenible.

Codensa. (2016). *Informe de Sostenibilidad 2016*. Bogotá: Grupo Enel.

PNUMA. (2014). *Convenio de Basilea sobre el Control de los Movimientos Transfronterizos de los Desechos Peligrosos y su Eliminación*. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. Chatelaine: Convenio de Basilea.

Atáres, L. (2011). Fundamentos de Cinética Química: Ecuación cinética. *RiuNet Universidad Politècnica de Valencia* .

Li, Y.-F., Harner, T., Liu, L., Zhang, Z., Ren, N.-Q., Jia, H., y otros. (2010). Polychlorinated Biphenyls in Global Air and Surface Soil: Distributions, Air-Soil Exchange, and Fractionation Effect. *Environmental Science and Technology* , 2784-2790.

ASTDR. (6 de Mayo de 2016). Resúmenes de Salud Pública - Bifenilos policlorados (BPCs) [Polychlorinated Biphenyls (PCBs)]. Atlanta, Buford, Estados Unidos. Recuperado el 10 de Abril de 2018, de https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs17.html

- Parkinson, A., Safe, L., Mullin, M., Lutz, R., Sipes, I., Hayes, M., y otros. (2012). *Polychlorinated Biphenyls (PCB's): Mammalian and Environmental Toxicology* (Vol. I). Berlin: Springer Nature.
- Miller, C., Sanchez, E., Mucio, S., Mendoza, J., & Leon, M. (2009). Los contaminantes ambientales bifenilos policlorados (PCB) y sus efectos sobre el sistema nervioso y la salud. *Salud Mental* , 32 (4), 52-55.
- Richardson, J. (2004). Acute exposure to aroclor 1016 or 1260 differentially affects dopamine transporter and vesicular monoamine transporter 2 levels. *Toxicology Letters* , 29-40.
- MADS. (2015). *Desarrollo de la Capacidad para la Gestión y Eliminación Ambientalmente Adecuada de PCB en Colombia*. Bogotá: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- UNISDR. (2015). *Consideraciones para Fortalecer una Estrategia Suramericana para la Reducción del Riesgo de Desastres*. Montevideo: Naciones Unidas.
- Orozco, A., Treviño, F., & Square, J. (2012). Comunicación y Percepción Social del Riesgo: Retos de Participación. *Razón y Palabra* , electrónica.
- OPS. (2013). *Creación de una estrategia de comunicación para la influenza aviar y la influenza pandémica*. México D.F: Organización Mundial de la Salud.
- Casanova, J., Vega, L., & Arroyave, J. (2016). Lecciones aprendidas en la comunicación en salud y de riesgo en el manejo del virus del Chikungunya y otras enfermedades transmitidas por el mismo vector. *Salud Uninorte* , 32 (1), 35-55.