

**METODOLOGÍA PARA REPRESENTAR DISTRIBUCIÓN DE
CONTAMINACIÓN DE SUELOS IMPACTADOS CON HIDROCARBUROS
USANDO ANÁLISIS ESPACIAL Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN
GEOGRÁFICA.**



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
ÁREA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCIÓN GENERAL DE POSTGRADO
MAESTRÍA EN INGENIERÍA AMBIENTAL



**METODOLOGÍA PARA REPRESENTAR DISTRIBUCIÓN DE
CONTAMINACIÓN DE SUELOS IMPACTADOS CON HIDROCARBUROS
USANDO ANÁLISIS ESPACIAL Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN
GEOGRÁFICA**

Autor(a): Esther J. Delgado Mata.

Tutor(a): MSc. Auxilia Mallía

Valencia, octubre 2018



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
ÁREA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCIÓN GENERAL DE POSTGRADO
MAESTRÍA EN INGENIERÍA AMBIENTAL



**METODOLOGÍA PARA REPRESENTAR DISTRIBUCIÓN DE
CONTAMINACIÓN DE SUELOS IMPACTADOS CON HIDROCARBUROS
UTILIZANDO ANÁLISIS ESPACIAL Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN
GEOGRÁFICA**

Autor(a):

Esther J. Delgado M.

Trabajo de grado presentado ante el Área de Estudios de Postgrado de la Universidad de Carabobo para optar al Título de Magister en Ingeniería Ambiental.

Valencia, octubre 2018

DEDICATORIA

A mis padres, esos seres maravillosos, quienes, con su cariño y principios morales, me enseñaron que el estudio y el trabajo propio son las únicas vías para lograr todas mis metas.

¡Sus bendiciones!

A mi esposo y mis hijos, por su amor y apoyo incondicional.

A papá Dios, siempre luz, siempre guía, siempre presente hasta en mis momentos más oscuros.

AGRADECIMIENTO

A la profesora Auxilia Mallía, por ser una guía y apoyo durante el desarrollo de mi trabajo.

A mi compañera Odalys Morales, por acompañarme, apoyarme y ser mi equipo durante el desarrollo de la maestría. Realmente fue divertido trabajar contigo.



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
ÁREA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCIÓN GENERAL DE POSTGRADO
MAESTRÍA EN INGENIERÍA AMBIENTAL



METODOLOGÍA PARA REPRESENTAR DISTRIBUCIÓN DE CONTAMINACIÓN DE SUELOS IMPACTADOS CON HIDROCARBUROS USANDO ANÁLISIS ESPACIAL Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Autor: **Ing. Esther J. Delgado M.**

Tutor: **MSc. Auxilia Mallía**

Fecha: **octubre 2018.**

RESUMEN

La presente investigación tiene como objetivo general, desarrollar una metodología para generar mapas de distribución de contaminantes, utilizando georreferenciación y sistemas de información geográfica. Se investigaron las diferentes etapas necesarias para evaluar áreas impactadas por hidrocarburos de petróleo y los métodos geoestadísticos y no geoestadísticos, disponibles para realizar interpolaciones y generar mapas de distribución de contaminantes haciendo predicciones de valores en sitios no muestreados. Para ello, se tomaron los datos primarios de investigaciones anteriores, para así validar las diferentes etapas del procedimiento y finalmente se generó la metodología propuesta. El uso de sistemas de información geográfica y las proyecciones cartográficas para realizar la georreferenciación de los puntos sobre la superficie terrestre y su ubicación en mapas, es un factor determinante para representar adecuadamente los resultados, de manera que sean aprovechables para establecer estrategias de saneamiento. Se concluye, que el conocimiento del proceso, el uso final que se dará a la información, la estrategia de muestreo, así como la determinación de la dependencia espacial de las variables, son determinantes para poder seleccionar el método de interpolación adecuado y lograr predicciones más precisas.

Palabras claves: georreferenciación, sistemas de información geográfica, geoestadística, interpolación.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1.....	3
EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	3
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	4
1.3 OBJETIVOS	5
1.3.1 <i>Objetivo General</i>	5
1.3.2 <i>Objetivos Específicos</i>	5
1.4 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	5
1.5 ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN.....	6
1.6 LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN.....	7
CAPÍTULO 2.....	8
FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	8
2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN.....	8
2.2 BASES TEÓRICAS.....	12
2.2.1 <i>El suelo</i>	12
2.2.2 <i>Los suelos y su química</i>	12
2.2.3 <i>Contaminación de los suelos</i>	14
2.2.4 <i>Contaminación de los suelos con hidrocarburos de petróleo</i>	15
2.2.5 <i>Hidrocarburos totales de petróleo</i>	17
2.2.6 <i>Análisis de riesgo</i>	18
2.2.7 <i>La Biorremediación</i>	21
2.2.8 <i>La georreferenciación</i>	23
2.2.9 <i>Sistema de posicionamiento global (GPS)</i>	23
2.2.10 <i>Conceptos básicos Geodesia</i>	24
2.2.11 <i>Sistemas de coordenadas</i>	29
2.2.12 <i>Proyecciones cartográficas</i>	30
2.2.13 <i>Sistemas de información geográfica (SIG)</i>	35
2.2.14 <i>Geoestadística</i>	38
2.2.14.1 Continuidad espacial	39

2.2.14.2	Variable regionalizada	41
2.2.14.3	Momentos de una variable regionalizada	42
2.2.14.4	Estacionariedad	42
2.2.14.5	Estacionariedad de segundo orden	43
2.2.14.6	El semivariograma experimental	43
2.2.15	<i>Análisis espacial</i>	45
2.2.15.1	Tipos de análisis espacial	45
2.2.15.2	Estadísticas espaciales	46
2.2.15.3	La interpolación	46
2.2.15.4	Elección del método adecuado de interpolación	47
2.2.15.5	Validación del método.....	48
2.3	MARCO LEGAL	48
2.4	DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS	50
CAPÍTULO 3.....		52
MARCO METODOLÓGICO.....		52
3.1	TIPO DE INVESTIGACIÓN	52
3.2	FASES DE LA INVESTIGACIÓN	52
3.2.1	<i>Identificación de las fuentes de contaminantes de suelos impactados por hidrocarburos y su impacto en el ambiente.....</i>	<i>52</i>
3.2.1.1	Definición del modelo conceptual del sitio contaminado (MCS).....	53
3.2.2	<i>Definición del mecanismo para la recolección de datos.....</i>	<i>57</i>
3.2.2.1	Elaboración de un plan de muestreo.....	58
3.2.2.1.1	Definición de los objetivos del muestreo	58
3.2.2.1.2	Preparación de la información preliminar	59
3.2.2.1.3	Definir la estrategia de muestreo.....	61
a)	Esquemas de muestreo	61
b)	Tipos de muestreo	65
c)	Definición del número de muestras	67
d)	Profundidad de muestreo.....	70
e)	Tipos de muestras	71
f)	Técnicas de muestreo.....	71
3.2.2.1.4	Trabajo de campo.....	72
3.2.2.1.5	Informe final del procedimiento de muestreo	72

3.2.2.2	Metodología para la evaluación de riesgos.....	72
3.2.2.2.1	Identificación del problema.....	72
3.2.2.2.2	Evaluación de la toxicidad.....	73
3.2.2.2.3	Evaluación de la exposición.....	78
a)	Ingestión accidental:.....	78
b)	Inhalación.....	79
c)	Contacto dérmico.....	80
3.2.2.2.4	Caracterización del riesgo.....	80
3.2.3	<i>Evaluación de las técnicas para realizar el análisis espacial del área en estudio.....</i>	<i>81</i>
3.2.4	<i>Establecer la distribución de los contaminantes en el suelo utilizando sistemas de información geográfica.....</i>	<i>98</i>
3.2.5	<i>Diseño de la metodología para presentar la distribución de contaminación de suelos impactados con hidrocarburos, en forma espacial y georreferenciada.....</i>	<i>101</i>
CAPÍTULO 4.....	102	
PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	102	
4.1	UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	102
4.2	IDENTIFICACIÓN DE LAS FUENTES DE CONTAMINANTES. MODELO CONCEPTUAL DEL ÁREA.....	105
4.3	RESULTADOS DEL MUESTREO.....	110
4.3.1	<i>Análisis de los resultados de las propiedades físico-químicas del suelo.....</i>	<i>113</i>
4.3.2	<i>Análisis de riesgo.....</i>	<i>119</i>
4.4	ESTABLECER LA DISTRIBUCIÓN DE LOS CONTAMINANTES EN EL SUELO UTILIZANDO SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.....	124
4.5	PROPUESTA METODOLÓGICA.....	134
CAPÍTULO 5.....	135	
PROPUESTA METODOLÓGICA.....	135	
REPRESENTACIÓN DE CONTAMINACIÓN EN SUELOS IMPACTADOS CON HIDROCARBUROS DE PETRÓLEO UTILIZANDO ANÁLISIS ESPACIAL Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.....	135	
5.1	OBJETIVO.....	135
5.2	ALCANCE.....	135
5.3	ETAPAS DEL PROCESO.....	135
5.3.1	<i>Identificación de la zona de interés.....</i>	<i>136</i>
5.3.2	<i>Inspección Preliminar.....</i>	<i>136</i>

5.3.3	<i>Elaborar el modelo conceptual del sitio contaminado (MCS)</i>	138
5.3.4	<i>Elaborar el plan de muestreo</i>	138
5.3.5	<i>Ejecutar el muestreo de acuerdo al plan formulado y análisis de resultados</i>	139
5.3.6	<i>Elaborar análisis de riesgo</i>	141
5.3.7	<i>Elaborar el mapa de distribución de contaminantes</i>	141
5.3.7.1	Realizar análisis de los datos.....	141
5.3.7.2	Seleccionar el método de interpolación a utilizar.....	143
5.3.7.3	Demostrar la dependencia espacial de los datos.....	143
5.3.7.4	Aplicar el método de interpolación espacial seleccionado y generar los mapas de distribución de contaminantes.....	149
5.3.8	<i>Seleccionar la técnica de saneamiento</i>	150
5.3.9	<i>Diseño aplicación de la técnica de saneamiento, muestreo, análisis y elaboración del mapa post-saneamiento</i>	150
5.3.10	<i>Recomendaciones finales para el uso del suelo</i>	150
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		151
CONCLUSIONES		151
RECOMENDACIONES		154
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		155
APÉNDICES Y ANEXOS		160

ÍNDICE DE TABLAS, CUADROS Y FIGURAS

Índice de Tablas

TABLA 2.1 TÉRMINOS DESCRIPTIVOS DE LOS SUELOS SEGÚN SU PH Y EFECTOS ESPERABLES.....	14
TABLA 2.2 TIPOS DE PETRÓLEO CRUDO SEGÚN SU GRAVEDAD API	16
TABLA 2.3 TÉCNICAS USADAS PARA LA DESCONTAMINACIÓN DE SUELOS.....	19
TABLA 2.4 ELIPSOIDES DE REFERENCIA Y SUS PARÁMETROS.....	26
TABLA 3.1 COMPORTAMIENTO DE LOS DERRAMES DE PETRÓLEO EN EL SUELO	53
TABLA 3.2 LÍMITES PERMISIBLES EN LA MEZCLA SUELO-DESECHO	56
TABLA 3.3 CONDICIONES PARA EL BIOTRATAMIENTO.....	57
TABLA 3.4 TIPOS DE MUESTREO DE ACUERDO CON LA UBICACIÓN DE LOS PUNTOS EN EL ESPACIO	62
TABLA 3.5 TIPOS DE MUESTREO DE ACUERDO CON LOS OBJETIVOS	65
TABLA 3.6 NÚMERO MÍNIMO DE PUNTOS PARA EL MUESTREO DE IDENTIFICACIÓN	67
TABLA 3.7 NÚMERO MÍNIMO DE PUNTOS PARA EL MUESTREO DE DETALLES.....	68
TABLA 3.8 NÚMERO MÍNIMO DE PUNTOS PARA EL MUESTREO DE COMPROBACIÓN	69
TABLA 3.9 PROFUNDIDAD DEL MUESTREO SEGÚN EL USO DEL SUELO	70
TABLA 3.10 SISTEMAS PARA LA TOMA DE MUESTRAS DE SUELO	71
TABLA 3.11 MÉTODOS DE INTERPOLACIÓN ESPACIAL	84
TABLA 3.12 MÉTODOS NO GEOESTADÍSTICO	85
TABLA 3.13 INTERPOLADORES ESPACIALES GEOESTADÍSTICOS	96
TABLA 3.14 MÉTODOS DE ANÁLISIS UTILIZADOS EN EL LABORATORIO PARA EL ESTUDIO FÍSICO-QUÍMICO DE LOS SUELOS, MATERIALES ORGÁNICOS Y METALES	99
TABLA 4.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA GENERAL DEL SUELO CONTAMINADO CON HIDROCARBUROS EN YARACAL, ESTADO FALCÓN	107
TABLA 4.2 COORDENADAS DE PUNTOS MUESTREADOS EN LA ZONA EN ESTUDIO	110
TABLA 4.3 DISTANCIAS ENTRE LOS PUNTOS DE MUESTREO [M].....	111
TABLA 4.4 PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DE LOS SUELOS IMPACTADOS CON HIDROCARBUROS EN LA ZONA EN ESTUDIO	114
TABLA 4.5 CONTENIDO TOTAL DE METALES MEDIDOS EN LAS MUESTRAS DE SUELOS IMPACTADOS Y NO IMPACTADOS CON HIDROCARBUROS DE PETRÓLEO EN LA ZONA EN ESTUDIO.....	115

TABLA.4.6 CARACTERIZACIÓN DEL RIESGO	121
--	-----

Índice de Figuras

FIGURA 2.1 LAS FAMILIAS DE HIDROCARBUROS	17
FIGURA 2.2 ELEMENTOS DEL RIESGO	21
FIGURA 2.3 ANÁLISIS DE RIESGO.....	22
FIGURA 2.4 ELIPSOIDE.....	25
FIGURA 2.5 REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL GEOIDE Y EL ELIPSOIDE	27
FIGURA 2.6 ELIPSOIDE Y GEOIDE DE REFERENCIA.....	28
FIGURA 2.7 COORDENADAS GEOGRÁFICAS: LATITUD Y LONGITUD.....	29
FIGURA 2.8 PROYECCIÓN TRANSVERSAL MERCATOR.....	31
FIGURA 2.9 SISTEMA DE COORDENADAS UNIVERSAL TRANSVERSO DE MERCATOR (UTM).....	33
FIGURA 2.10 DETALLE DE UNA ZONA UTM	34
FIGURA 2.11 UBICACIÓN DE LA REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA EN EL SISTEMA DE COORDENADAS UTM. FUENTE: GOOGLE EARTH	34
FIGURA 2.12 DETALLE DE LA UBICACIÓN DE LA REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA EN EL SISTEMA DE COORDENADAS UTM. FUENTE: GOOGLE EARTH.....	35
FIGURA 2.13 EJEMPLO DE UN MODELO DE SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.	36
FIGURA 2.14 COMPONENTES DE UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA	38
FIGURA 2.15 EJEMPLOS DE DIAGRAMAS DE DISPERSIÓN-H, PARA CUATRO DISTANCIAS DE SEPARACIÓN EN SENTIDO NORTE	40
FIGURA 2.16 EJEMPLO DE UN SEMIVARIOGRAMA DONDE SE MUESTRA EL RANGO, EL NUGGET C_0 Y EL UMBRAL $(C_0 + C_1)$. FUENTE: LI Y HEAP, 2008.	44
FIGURA 3.1 DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCEDIMIENTO DE SELECCIÓN DE LOS OBJETIVOS DEL MUESTREO.....	60
FIGURA 3.2 DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCEDIMIENTO DE SELECCIÓN DEL ESQUEMA DE MUESTREO DE ACUERDO CON LOS OBJETIVOS.	66
FIGURA 3.3 EJEMPLO DE UN MODELO CONCEPTUAL	74
FIGURA 3.4 SELECCIÓN DEL MÉTODO DE INTERPOLACIÓN, BASADO EN EL TIPO DE SALIDA QUE GENERA.	88

FIGURA 3.5 ÁRBOL DE DECISIÓN DEL MÉTODO DE INTERPOLACIÓN, BASADO EN LA EXISTENCIA DE CORRELACIÓN ESPACIAL	89
FIGURA 3.6 MODELOS DE VARIOGRAMAS	92
FIGURA 3.7 MODELO DE INDEPENDENCIA O "PEPITA PURO"	94
FIGURA 4.1 MACRO LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	103
FIGURA 4.2 DETALLE DE RUTA DE ACCESO AL ÁREA.....	103
FIGURA 4.3 DETALLE DEL ÁREA	104
FIGURA 4.4 DERRAMES DE PETRÓLEO CRUDO EN YARACAL, ESTADO FALCÓN	106
FIGURA 4.5 DERRAMES DE PETRÓLEO CRUDO EN EL ÁREA EN ESTUDIO	106
FIGURA 4.6 MODELO CONCEPTUAL DEL SITIO	109
FIGURA 4.7 UBICACIÓN DE LOS PUNTOS DE MUESTREO.....	112
FIGURA 4.8 GRÁFICOS DE DISPERSIÓN DE LAS VARIABLES FÍSICO-QUÍMICAS EN FUNCIÓN DEL PORCENTAJE DE TPH	116
FIGURA 4.9 GRÁFICOS DE DISPERSIÓN DE LOS METALES VS PORCENTAJE DE TPH.....	118
FIGURA 4.10 MAPA DE DISTRIBUCIÓN DEL PORCENTAJE DE TPH, UTILIZANDO MÉTODO DE INTERPOLACIÓN IDW	126
FIGURA 4.11 MAPA DE DISTRIBUCIÓN DE PH, UTILIZANDO INTERPOLACIÓN IDW	127
FIGURA 4.12 MAPA DE DISTRIBUCIÓN DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA, UTILIZANDO INTERPOLACIÓN IDW	127
FIGURA 4.13 MAPA DE DISTRIBUCIÓN DE HUMEDAD RELATIVA, UTILIZANDO INTERPOLACIÓN IDW	128
FIGURA 4.14 MAPA DE DISTRIBUCIÓN DE CE, UTILIZANDO INTERPOLACIÓN IDW	128
FIGURA 4.15 MAPA DE DISTRIBUCIÓN DE CARBONO ORGÁNICO, UTILIZANDO INTERPOLACIÓN IDW	129
FIGURA 4.16 MAPA DE DISTRIBUCIÓN DE LA CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIÓNICO, UTILIZANDO INTERPOLACIÓN IDW	129
FIGURA 4.17 MAPA DE DISTRIBUCIÓN DE MANGANESO, UTILIZANDO INTERPOLACIÓN IDW	130
FIGURA 4.18 MAPA DE DISTRIBUCIÓN DE CADMIO, UTILIZANDO INTERPOLACIÓN IDW	130
FIGURA 4.19 MAPA DE DISTRIBUCIÓN DE CROMO, UTILIZANDO INTERPOLACIÓN IDW	131
FIGURA 4.20 MAPA DE INTERPOLACIÓN DE COBRE, UTILIZANDO INTERPOLACIÓN IDW	131
FIGURA 4.21 MAPA DE DISTRIBUCIÓN DE COBALTO, UTILIZANDO INTERPOLACIÓN IDW	132
FIGURA 4.22 MAPA DE DISTRIBUCIÓN DE ZINC, UTILIZANDO INTERPOLACIÓN IDW	132
FIGURA 4.23 MAPA DE DISTRIBUCIÓN DE NÍQUEL, UTILIZANDO INTERPOLACIÓN IDW.....	133
FIGURA 4.24 MAPA DE DISTRIBUCIÓN DE HIERRO, UTILIZANDO INTERPOLACIÓN IDW.....	133
FIGURA 5.1 DIAGRAMA DE FLUJO GENERAL DEL PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO.....	137
FIGURA 5.2 DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCEDIMIENTO PARA LA ELABORACIÓN DEL PLAN DE MUESTREO.....	140

FIGURA 5.3 DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE ELABORACIÓN DEL MAPA DE DISTRIBUCIÓN DE CONTAMINANTES...	142
FIGURA 5.4 MODELO PARA LA PRESENTACIÓN DEL MAPA DE COORDENADAS DE LOS PUNTOS DE MUESTREO	144
FIGURA 5.5 EJEMPLO GRÁFICO DE DISPERSIÓN PARA UNA H	146
FIGURA 5.6 EJEMPLO DE SEMIVARIGRAMA EXPERIMENTAL	147
FIGURA 5.7 EJEMPLO AJUSTE DEL SEMIVARIOGRAMA EXPERIMENTAL	149

INTRODUCCIÓN

Las actividades antrópicas son las responsables de los mayores impactos al medio ambiente. Afortunadamente, es también el hombre quien, con sus avances tecnológicos, ha diseñado sistemas de computación, comunicaciones satelitales y sistemas de geoposicionamiento, que abren un amplio campo para que la lucha por la conservación del ambiente no sea tan desigual. Dentro de estos avances, los sistemas de información geográfica desde hace algunas décadas, han brindado una herramienta poderosa para aplicaciones de Ingeniería Ambiental.

Los sistemas de información geográfica, permiten utilizar una gran cantidad de herramientas matemáticas, estadísticas, geoestadística, gráficas, y de manejo de base de datos, para aplicarlas a diferentes áreas del conocimiento, para analizar y procesar datos y generar información de utilidad para la protección del medio ambiente.

En el presente trabajo, se realiza una investigación para determinar las etapas necesarias para formular una metodología que utilice análisis espacial y sistemas de información geográfica para elaborar mapas de áreas, cuyos suelos estén impactados por derrames de hidrocarburos de petróleo y a las cuales se aplicarán estrategias de saneamiento. Estas herramientas, permiten hacer inferencias de los valores de variables en áreas no muestreadas, con los resultados de análisis realizados en áreas muestreadas, utilizando el análisis espacial.

En la etapa investigativa, se evalúan las opciones disponibles y luego mediante la aplicación de un caso de estudio se validan las diferentes etapas necesarias para desarrollar la guía para la aplicación de un método para casos generales, donde se desean generar mapas de distribución de contaminantes en el suelo, para sitios impactados por hidrocarburos de petróleo, detallando su ubicación en el espacio geográfico.

CAPÍTULO 1

EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1 Planteamiento del problema.

El avance de la tecnología, los requerimientos de energía y el crecimiento de la población humana, demandan la ejecución de proyectos que permitan el uso de diferentes fuentes de energía para la ejecución de actividades tanto domésticas como industriales. Venezuela, como país productor de petróleo, les da un uso intensivo a sus grandes reservas de petróleo y por ello la explotación, refinación, transporte, distribución y uso de los hidrocarburos, genera múltiples oportunidades de impactar al ambiente, particularmente los suelos, con peligrosas fuentes de contaminación.

Cuando se realiza un estudio ambiental, el muestreo del área impactada con sus respectivos análisis, permite identificar y cuantificar las sustancias presentes, ya sean tóxicas o no, con la finalidad de diagnosticar adecuadamente los niveles de contaminación y tomar las medidas de remediación necesarias. Sin embargo, desde el punto de vista práctico y económico, en algunos casos, no es posible muestrear grandes áreas para realizar mapas con la distribución de las sustancias, estando limitados a presentar los valores de los contaminantes en los puntos muestreados de forma discreta. Los investigadores, normalmente utilizan mapas y sistemas de información geográfica para presentar sus hallazgos, por esta razón, se planteó la necesidad de una metodología que presentara las diferentes etapas requeridas para utilizar el muestreo de un área contaminada para proyectar al área circundante, los posibles efectos de la distribución de estas sustancias, para la elaboración de mapas georreferenciados y presentar la distribución espacial de los contaminantes.

La georreferenciación consiste en ubicar en el espacio, un objeto en un sistema de coordenadas determinados. La manipulación, análisis, modelación y visualización de datos espacialmente georreferenciados, son importantes para el adecuado manejo de la información y la ubicación espacial de los puntos muestreados. En la actualidad, donde la tecnología y las telecomunicaciones proporcionan herramientas importantes para la aplicación del conocimiento científico, los sistemas de información geográfica, ofrecen alternativas para profundizar estos análisis.

1.2 Formulación del problema

La representación de datos de manera georreferenciada para lograr obtener información importante desde el punto de vista del ambiente, es una metodología que se ha venido usando desde los años noventa en aplicaciones medio ambientales. Su uso en la elaboración de mapas es de mucha importancia en la representación de datos que permita generar información para la toma de decisiones. Todo esto se ha venido ampliando con el uso de sistemas de información geográfica, los cuales además permiten utilizar múltiples herramientas para el análisis espacial de datos. El uso de la geoestadística, es particularmente útil para el análisis de fenómenos espaciales y utilizar técnicas de interpolación para predecir el valor de la variable en diferentes puntos del área en estudio.

En la presente investigación, se plantea la creación de una metodología que permita representar en mapas, la base de datos de la distribución de contaminantes en suelos impactados por hidrocarburos de petróleo, obteniendo una representación continua de la distribución de los mismos, gracias a la información discreta arrojada por los resultados del muestreo, todo esto mediante el uso de geoestadística, técnicas de interpolación y sistemas de información geográfica.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Desarrollar una metodología para representar los datos espaciales y de forma georreferenciada de la distribución de contaminación en suelos impactados con hidrocarburos de petróleo, utilizando sistemas de información geográfica para su aplicación en un protocolo de biorremediación.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Identificar las fuentes de contaminantes de suelos impactados por hidrocarburos de petróleo.
2. Definir el mecanismo para la recolección de datos.
3. Identificar las técnicas de análisis espacial del área en estudio.
4. Establecer la distribución de los contaminantes en el suelo, utilizando sistemas de información geográfica.
5. Diseñar la metodología para presentar la distribución de contaminación en suelos impactados con hidrocarburos de petróleo en forma espacial y georreferenciada, con la finalidad de utilizarlo en un protocolo de biorremediación.

1.4 Justificación de la investigación

La contaminación por derrames de petróleo y sus derivados es un problema que impacta significativamente tanto a la sociedad como al medio ambiente. En zonas, cuya principal actividad económica es la agricultura y la ganadería, los derrames de petróleo afectan los suelos y puede llegar hasta las aguas subterráneas, contaminándolas y afectando las opciones del uso de la tierra, lo que a su vez repercute en las actividades de las comunidades ubicadas en la región. Contar con opciones para sanear el terreno y

hacer estos proyectos factibles, técnica y económicamente, proporciona alternativas de valor para dichas comunidades.

Desde el punto de vista metodológico, las alternativas para desarrollar herramientas que sirva de guía para la implantación de una técnica o procedimiento, representa un aporte importante en todo proceso de desarrollo del conocimiento. Sin coartar la creatividad u originalidad del investigador, puede proporcionar puntos de chequeo importantes para establecer un criterio o normalización de la aplicación de los mismos. Adicionalmente, con el avance de la tecnología de información, la aplicación de sistemas de información en aplicaciones medioambientales, son cada vez más útiles, por cuanto permite integrar y representar una gran cantidad de datos y ubicarlos en el espacio geográfico. Estas “capas” de información, permiten representar más fácilmente los datos y facilita la elaboración de conclusiones y la toma de decisiones, permitiendo optimizar los recursos técnicos y económicos al utilizar resultados en áreas muestreadas para realizar predicciones en áreas no muestreadas correlacionadas espacialmente. Para ello se utiliza la geoestadística, la cual es una rama de la estadística que estudia fenómenos espaciales y cuyo propósito esencial es la interpolación.

1.5 Alcance de la investigación.

La investigación está orientada a obtener los procedimientos y estrategias metodológicas, para ubicar en el espacio y representar mapas de distribución de contaminantes de petróleo en el suelo, donde se planea aplicar estrategias de biorremediación. Para ello se circunscribe al análisis espacial de datos y la representación con sistemas de información geográfica. El procedimiento de biorremediación a aplicar, no forma parte integral del presente trabajo.

1.6 Limitaciones de la investigación.

Para esta investigación, se trabajó con datos primarios de investigaciones previas, que aportaron toda la información necesaria para validar el procedimiento metodológico.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Antecedentes de la investigación

Corrales y Guanipa (2016). **Propuesta de técnicas de biorremediación para un suelo contaminado con hidrocarburos en la zona Mene de San Lorenzo en Yaracal, estado Falcón.** Facultad de Ingeniería Universidad de Carabobo. Valencia. Venezuela.

El trabajo plantea una propuesta para sanear los suelos impactados por hidrocarburos provenientes de pozos de petróleo abandonados y que emanan crudo espontáneamente al ambiente, aplicando biorremediación. Presenta una investigación detallada de las variables que influyen en el proceso, análisis de riesgo a través de las estimaciones de toxicidad y exposición a los contaminantes y la representación cartográfica de la distribución de los elementos en el área de estudio. Se concluye que el proceso de remediación más adecuado para el caso, es el uso de las técnicas de bioestimulación y biopilas/compostaje con adición de nutrientes y monitoreo continuo del lugar. Esta investigación, trabaja con la data generada de muestreo y análisis fisicoquímicos y de metales de los suelos de la zona cercana al Mene de San Lorenzo en Yaracal, estado Falcón utilizado como caso de estudio de la presente investigación.

Melo, C. (2012). **Análisis geoestadístico espacio tiempo basado en distancias y splines con aplicaciones.** Universidad de Barcelona, Barcelona España.

Este trabajo es una tesis de doctorado en estadística, en la cual se presenta en detalle métodos de análisis espacial y técnicas de estimaciones de variables regionalizadas. En ella se proponen innovaciones en la predicción espacio y espacio-temporal a partir de

método geoestadísticos kriging y de funciones de base radial considerando métodos basados en distancia. Por medio de las distancias en las variables explicativas, se propusieron modificaciones en los métodos kriging universal y en la interpolación con splines espacial y espacio-temporal. Aporta importantes conceptos esenciales de geoestadísticas y métodos de interpolación, que son de gran utilidad como referencias para el trabajo a desarrollar en las predicciones de valores de las variables en el área de estudio y en la elaboración de los mapas de distribución de contaminantes.

Paredes, Salinas, Martínez y Jiménez (2012). **Evaluación y comparación de métodos de interpolación determinísticos y probabilísticos para la generación de modelos digitales de elevación.** Facultad de Ingeniería y Ciencias Universidad Autónoma de Tamaulipas. México.

Este trabajo es importante, porque aun cuando se realiza específicamente la evaluación para modelos digitales de elevación, en él se evalúa los niveles de error introducido en los estudios por diferentes métodos de interpolación y como estos afectan el resultado final para los usuarios de los modelos. El trabajo evalúa los niveles de precisión de los diferentes modelos y selecciona en base a los resultados el más idóneo para esta aplicación en particular. Entre los métodos de interpolación evaluados están el método IDW (Inverse Distance Weighting), el método ANUDEM, el método kriging ordinario (OK) y método kriging con modelo de tendencias (KT). El estudio concluye que el método KT, genera modelos de digitales de elevación más precisos que el resto de los modelos evaluados y sin la presencia de errores sistemáticos.

Noguera y Armado (2010). **Evaluación de metales en suelos contaminados por derrames de crudo en Yaracal, estado Falcón, Venezuela.** Laboratorio de Investigaciones Bioquímicas, Departamento de Química, Facultad Experimental de Ciencias y Tecnología. Universidad de Carabobo. Valencia, Venezuela.

En esta investigación, se evaluaron los contenidos de manganeso (Mn), cadmio (Cd), cromo (Cr), cobre (Cu), níquel (Ni), cobalto (Co), zinc (Zn), hierro (Fe) y molibdeno (Mo) en suelos impactados con petróleo, provenientes de pozos de petróleo abandonados en Yaracal, estado Falcón. Para determinar la concentración de metales las muestras fueron sometidas a digestión ácida mediante espectrofotometría de absorción atómica de llama. La materia orgánica extraíble por solvente se cuantificó mediante una extracción Soxhlet, para obtener los porcentajes de hidrocarburos totales del petróleo (TPH). Los contenidos de Cr, Co, Fe y Ni se correlacionaron con los contenidos de TPH. En los suelos impactados con petróleo se detectaron valores de Cd, Ni y Cr, superiores a los permisibles según la regulación venezolana. Este trabajo generó los datos primarios utilizados como caso de estudio en la presente investigación.

Solana, A. (2009). **La Biodegradación de Hidrocarburos y su Aplicación en la Biorremediación de Suelos**. Universidad de Barcelona, España.

En este trabajo se describe el proceso microbiano de biodegradación de hidrocarburos y los factores que lo condicionan como base científica para su aplicación en la tecnología de la biorremediación. Se destaca la importancia de llevar a cabo ensayos de tratabilidad previos a la implementación en el campo. Se presentan dos casos de biorremediación de suelos contaminados por aceites minerales y por creosota, respectivamente. Se describe los resultados obtenidos en los ensayos de tratabilidad y los obtenidos en su implantación en el campo. En el suelo contaminado por aceites minerales se aplicó la tecnología “in situ” del bioventeo y en el suelo contaminado por creosota se aplicó la tecnología de la biopila dinámica. Finalmente, establece la necesidad de revisar aspectos críticos a tenerse en cuenta para investigar como aquellos relacionados con la falta de biodisponibilidad y la recalcitrancia de algunos hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH) de elevado peso molecular y los parámetros que se usan para establecer cuándo un suelo está descontaminado.

Villatoro, Henríquez y Sancho. (2009). **Comparación de los interpoladores IDW y kriging, en la variación espacial de pH, Ca, CICE y P del suelo.** Facultad de Agronomía Universidad de Costa Rica.

En este trabajo los autores realizaron la comparación de dos métodos de interpolación para determinar los niveles de error de cada uno de ellos al momento de ser utilizados para el análisis espacial de la acidez del suelo (pH), calcio (Ca), fósforo (P) y capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE). Se evaluaron los interpoladores kriging e IDW, por ser de los más usados al momento de realizar análisis espaciales. Este trabajo concluye: “aunque ambos interpoladores tuvieron un desempeño similar, el kriging fue superior al predecir de una mejor manera la variación de pH”.

Montoya et al. (2009). **Propuesta metodológica para localización de estaciones de monitoreo de calidad de agua en redes de distribución utilizando sistemas de información geográfica.** Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente, Universidad del Valle, Colombia.

Con la metodología desarrollada en este estudio, se evidenció la importancia de los sistemas de información geográfica para utilizar y vincular todos los datos disponibles para ubicar estaciones de monitoreo del agua potable del sistema de distribución de Cali, Colombia. Con ello, se logró el establecimiento de zonas prioritarias para localizar dichas estaciones de acuerdo con la normativa nacional y los datos de la población a ser abastecida. Los resultados de este trabajo proporcionaron avances importantes en la construcción de mapas de riesgo para los sistemas de abastecimiento de agua.

Fernández, Llóbregat, Jiménez, Altomare y Labrador (2008). **Biodegradación de asfáltenos y resinas por microorganismos presentes en suelos contaminados por**

hidrocarburos. Centro de investigaciones Ambientales de la Universidad de Carabobo.

Esta investigación estuvo orientada a la recuperación de suelos agrícolas y ganaderos contaminados con crudos medianos, producto de pozos de extracción de petróleo abandonados, utilizando la técnica de biorremediación. Para ello, se seleccionó un área de estudio de la cual se tomaron las muestras necesarias para hacer los experimentos y se proporcionaron a nivel de laboratorio los medios adecuados comprobándose que las bacterias autóctonas pueden degradar moléculas de pesos moleculares altos, mediante nutrientes que estimulen la actividad microbiana y manteniendo condiciones adecuada de aireación y humedad en el suelo.

2.2 Bases teóricas.

2.2.1 El suelo

Es la capa más superficial de la corteza terrestre que sirve como medio natural para el crecimiento de las plantas. Está formado por la materia mineral y orgánica no consolidada, que ha estado sometida y muestra los efectos de factores genéticos y ambientales de: clima (incluyendo efectos de agua y temperatura) y macro y microorganismos, actuando sobre el material parental durante un período de tiempo. Un suelo difiere del material del cual se origina en muchas propiedades y características físicas, químicas, biológicas y morfológicas. (Soil Science Society of América, 2008).

2.2.2 Los suelos y su química

La química de los suelos, es la rama de la ciencia del estudio de los suelos que evalúa la composición química, las propiedades químicas y las reacciones químicas de los suelos. (Sparks, 2003). Los conocimientos de todos estos factores son fundamentales para predecir el destino de los contaminantes en un determinado ambiente y permite

evaluar y tomar decisiones efectivas económicamente en la remediación de suelos contaminados.

Uno de los principales temas de estudio de la química de los suelos es la acidez de los mismos. Su importancia radica en que determina la disponibilidad de nutrientes para las plantas y los microorganismos. La medida de acidez o alcalinidad del suelo se mide por su pH (potencial de hidrogeno). El rango de pH que la mayoría de las plantas requiere, oscila entre 5,5 y 7,0 (cuando el pH es bajo los metales como el aluminio, el hierro y el manganeso, se hacen más solubles y tóxicos para las plantas, a medida que el pH se incrementa, disminuye la solubilidad y ocurre la precipitación (Zapata, 2004). Las plantas pueden sufrir deficiencias a medida que el pH aumenta por encima de la neutralidad (Sparks, 2003). En la tabla 2.1, se presenta un resumen de los términos descriptivos de los suelos de acuerdo con el pH y los efectos más representativos que se pueden obtener para cada rango.

La acidez o alcalinidad del suelo se logra: por causas naturales o por causas antrópicas (Zapata 2004). Entre las causas naturales tenemos: la meteorización, el clima y la mineralogía. Los procesos antrópicos que incrementan la acidez de los suelos son: la nutrición de las plantas, drenar suelos con compuestos reducidos de azufre, la fertilización y la contaminación química (lluvias ácidas). De allí que la medición del pH del suelo, sea un procedimiento necesario para determinar la calidad de los suelos para determinada actividad.

El valor de pH, también es muy importante para determinar la capacidad de intercambio catiónico (CIC) de un suelo. El CIC del suelo, indica el potencial para retener e intercambiar nutrientes y es la suma de los cationes intercambiables expresados en miliequivalentes por cada 100 gramos de suelo [meq/100gr].

Tabla 2.1 Términos descriptivos de los suelos según su pH y efectos esperables

Término Descriptivo	Rango de pH	Efectos a considerar
Extremadamente ácido	< 4.5	Condiciones muy desfavorables.
Muy fuertemente ácido	4.5 - 5.0	Toxicidad de Al ³⁺ y Exceso de Co, Cu, Fe, Mn, y Zn.
Fuertemente ácido	5.1 - 5.5	Deficiencia de Ca, K, N, Mg, Mo, P, S. Actividad bacteriana escasa.
Moderadamente ácido	5.6 - 6.0	Adecuado para la mayoría de los cultivos.
Ligeramente ácido	6.1 - 6,5	Máxima disponibilidad de nutrientes.
Neutro	6.6 - 7.3	Mínimos efectos tóxicos. Bajo pH 7,0 no hay carbonatos de calcio.
Ligeramente alcalino	7.4 - 7.8	Suelos generalmente con CaCO ₃
Moderadamente alcalino	7.9 - 8.4	Disminuye la disponibilidad de P. Deficiencia creciente de Co, Cu, Fe, Mn, Zn. Clorosis férrica.
Fuertemente alcalino	8.5 - 9.0	En suelos no sódicos, puede haber MgCO ₃ . Mayores problemas de clorosis férrica. Toxicidad de B.
Muy fuertemente alcalino	>9.0	Presencia de carbonato de sodio. Suelos sódicos toxicidad de B y Na. Deficiencias de micronutrientes excepto Mo. Actividad microbiana escasa. Condiciones muy desfavorables.

Nota: Adaptado de Sadzauka y Campillo, 1999; Sparks (2003) y USDA natural resources conservation service.

2.2.3 Contaminación de los suelos.

Existe un gran número de contaminantes del suelo: orgánicos e inorgánicos. Entre las propiedades de los suelos que pueden afectar la acumulación o biodisponibilidad de los contaminantes se encuentran: pH, la conductividad eléctrica (CE), el potencial

de óxido-reducción (REDOX), los óxidos e hidróxidos de hierro y manganeso, los carbonatos, la salinidad, el contenido de materia orgánica, la estructura, el contenido de arcillas, y la mineralogía de las arcillas. Las fuentes de los contaminantes pueden ser fertilizantes, pesticidas, depósitos ácidos, radionúclidos, desechos de actividades agrícolas e industriales y fallas de operaciones radioactivas.

Entre las actividades industriales que puede aportar importantes fuentes de contaminación esta la industria petrolera.

La industria petrolera está conformada por las actividades de exploración, perforación, extracción, refinación, distribución de hidrocarburos y sus derivados.

2.2.4 Contaminación de los suelos con hidrocarburos de petróleo.

Los hidrocarburos son compuestos formados por átomos de carbono e hidrógeno, de gran abundancia en la naturaleza, presentes principalmente en el petróleo y el gas natural (Chappín 1988, PEMEX 1988, Orllénez et. Al.2003).

El petróleo crudo es un producto oleoso formado por una mezcla de hidrocarburos y en ocasiones combinado con azufre, nitrógeno, oxígeno y algunos elementos metálicos. El petróleo tiene una proporción de 76 a 86% de carbono y 10 a 14% de hidrógeno Orllénez et.al.2003). De acuerdo con su grado de gravedad API, se puede clasificar de acuerdo a lo presentado en la tabla 2.2.

Los hidrocarburos se clasifican en dos grandes familias: los alifáticos y los aromáticos. En la figura 2.1, se presenta un esquema sobre los hidrocarburos de petróleo y las diferentes familias de compuestos o fracciones que los conforman.

Todas las actividades desarrolladas por la industria petrolera, requiere de una infraestructura industrial que puede generar derrames y fugas y de allí la contaminación del medio ambiente y en especial los suelos.

Tabla 2.2 Tipos de petróleo crudo según su gravedad API

Tipo de crudo	Escala API	Densidad [g/cm³]	Descripción
Ligero	30 - 40°	0,87 -0,83	Fácil extracción y transporte. Uso: refinación de combustible y sus derivados.
Mediano	22 -29,9°	0,92 -0,87	
Pesado	10 -21,9°	1 - 0,92	Fácil transporte, difícil extracción. Uso combustible y derivados.
Extra pesado	Menos 10°	>1	Difícil transporte y extracción. Uso: derivados.

Nota: Adaptado de venelogia.com

El impacto de estos hidrocarburos en el suelo, está influenciado en gran medida por las características del mismo y son importantes para determinar el grado de contaminación. Entre estas características se pueden considerar la estructura del suelo, el tamaño de las partículas, el contenido de humedad, la cantidad de materia orgánica, la permeabilidad, la profundidad del manto freático, los factores climatológicos como la temperatura y la precipitación pluvial. “Todas las variables en su conjunto definen el tamaño y la distribución tridimensional del frente de contaminación en una zona específica.” (Orlínéz et al. 2003).

Las propiedades físicas del suelo más impactadas por los hidrocarburos son: la estructura del suelo debido a la ruptura de agregado; el aumento de la retención de agua en la capa superficial y el potencial hídrico. Las propiedades químicas del suelo más impactadas por los derrames de hidrocarburos son: el carbono orgánico; el pH, el aumento de metales como hierro y manganeso y el aumento de fósforo disponible (Orlínéz et.al 2003).

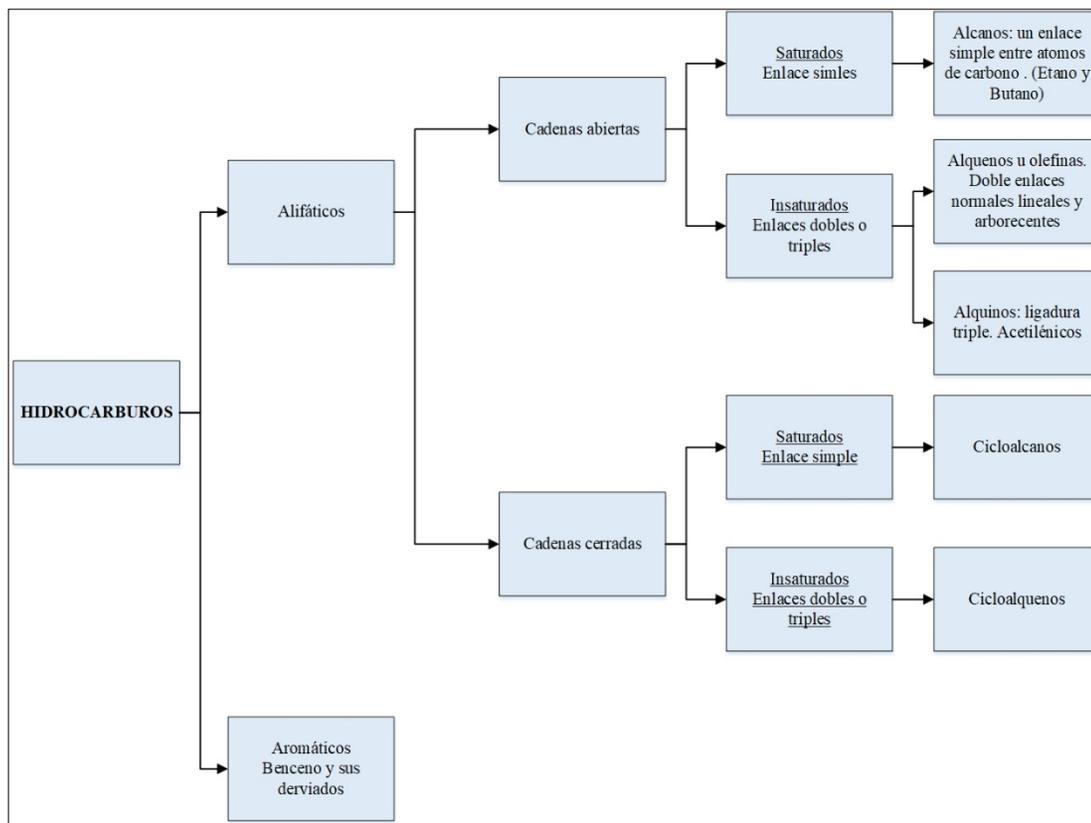


Figura 2.1 Las familias de hidrocarburos

Fuente: Adaptado de Orlinez et al.2003

2.2.5 Hidrocarburos totales de petróleo.

El término de hidrocarburos totales de petróleo (TPH), se usa para describir a un grupo extenso de sustancias químicas derivadas originalmente del petróleo crudo. En este sentido los TPH son realmente una mezcla de sustancias químicas y se denominan hidrocarburos porque están formadas por hidrógeno y carbono.

Los TPH, son liberados al ambiente a raíz de accidentes industriales, comerciales o privados, por derrames de hidrocarburos de petróleo y sus derivados. La cantidad que se encuentra en una muestra sirve como indicador general del tipo de contaminación que existe en un sitio. Los TPH se clasifican en grupos basados en el comportamiento

similar en el suelo o en el agua y se denominan fracciones. Cada fracción contiene muchos componentes individuales.

La exposición a los TPH, puede ocurrir a través de la inhalación de aire contaminado, a través del agua, si ha habido derrames y se han desplazado a las aguas subterráneas o al manipular el suelo contaminado también. Los efectos tóxicos de los hidrocarburos en el ambiente dependen de una cantidad de factores, entre ellos tenemos: la cantidad y composición del petróleo; la frecuencia y el tiempo de exposición; la extensión del derrame; las condiciones ambientales y las características del sitio como la biota del ecosistema.

Existen diferentes estrategias para descontaminar los suelos, que son más adecuadas para una situación u otra y por supuesto tienen diferentes impactos en los costos. En la tabla 2.3 se presentan un resumen de esta técnica sus ventajas, limitaciones y una referencia cualitativa de los costos, en relación con los recursos económicos que es necesario aplicar al proyecto.

2.2.6 Análisis de riesgo

El análisis de riesgo es un procedimiento metodológico para la evaluación de sitios impactados que permite analizar los efectos tóxicos de los compuestos que pueden afectar la salud.

De acuerdo con la definición establecida por la U. S. Environmental Protection Agency (USEPA), “riesgo es la oportunidad de ocasionar efectos dañinos a la salud humana o a un sistema ecológico como resultado de la exposición a un estresor ambiental”. Un estresor ambiental es cualquier entidad que puede afectar adversamente recursos naturales o el ecosistema completo, incluyendo plantas y animales, así como el ambiente con el cual estos interactúan.

Tabla 2.3 Técnicas usadas para la descontaminación de suelos

Tecnología	Ventajas	Limitaciones	Costo relativo de la inversión
<i>Técnicas “in situ”</i>			
Volatilización	Puede remover algunos Componentes resistentes a la biodegradación.	Solamente para compuestos orgánicos	Bajo
Biodegradación	Efectivo para algunos compuestos no volátiles.	Largo período de tiempo	Moderado
Fitorremediación	Efectivo con un número de químicos orgánicos e inorgánicos.	Las plantas a menudo son específicas para un tipo particular de contaminantes	Bajo a medio
Lixiviación	Puede ser aplicables a una amplia variedad de compuestos.	No usado comúnmente	Moderado
Aislamiento/ confinamiento	Físicamente previene e impide la migración.	Los compuestos no son destruidos	Bajo a moderado
<i>Técnicas “non-in-situ”</i>			
Tratamiento de tierras	Utiliza procesos de degradación natural.	Permanecen algunos residuos	Moderado
Tratamiento térmico	Es posible la completa destrucción.	Usualmente requiere características especiales	Alto
Incorporación asfáltica	Uso de instalaciones existentes.	Remoción incompleta de compuestos pesados	Moderado
Solidificación	Inmoviliza los compuestos	No es utilizada comúnmente para suelos	Moderado
Extracción y tratamiento de aguas subterráneas	Recuperación de productos y. restauración de las aguas subterráneas.		Moderado
Extracción química		No es practicada comúnmente	Alto
Excavación	Remoción de suelos del sitio.	Factibilidad de largo término	Moderado

Fuente: Sparks (2003).

El análisis de riesgo intenta dar respuesta técnica a tres interrogantes:

- Determinación de la amenaza: ¿Cuánto contaminante se encuentra presente en el medio?
- Determinación de la vulnerabilidad: ¿Cuánto contacto (exposición) una persona o receptor ecológico tiene con el ambiente contaminado?
- Determinación del riesgo: ¿Cuál es la toxicidad del elemento contaminante?

Los riesgos a la salud humana se componen de tres elementos, ver (figura 2.2). El receptor: se refiere a la población humana que se puede encontrar en las cercanías del sitio de la descarga; la fuente del riesgo, responsable de generar la concentración de compuestos de interés (CDI) en el medioambiente evaluado y la vía que es el mecanismo por el cual el receptor se ve expuesto a la fuente.

El cálculo del riesgo involucra el uso de ecuaciones matemáticas para cuantificar: la exposición humana a los CDI, denominada evaluación de la exposición y la toxicidad de los CDI, denominada evaluación toxicológica. Mediante la evaluación de riesgos se determina si el riesgo al que están expuesto los organismos o la población en un sitio contaminado es tolerable. (Rihm y Anacona, 2004).

La cuantificación del riesgo es una función de la concentración de los CDI, de los tiempos de exposición y de la cantidad de toxicidad de un CDI. Existen diversas metodologías para la evaluación de riesgo, pero en general se ejecuta siguiendo las etapas presentadas en el diagrama de flujo de la figura 2.3.

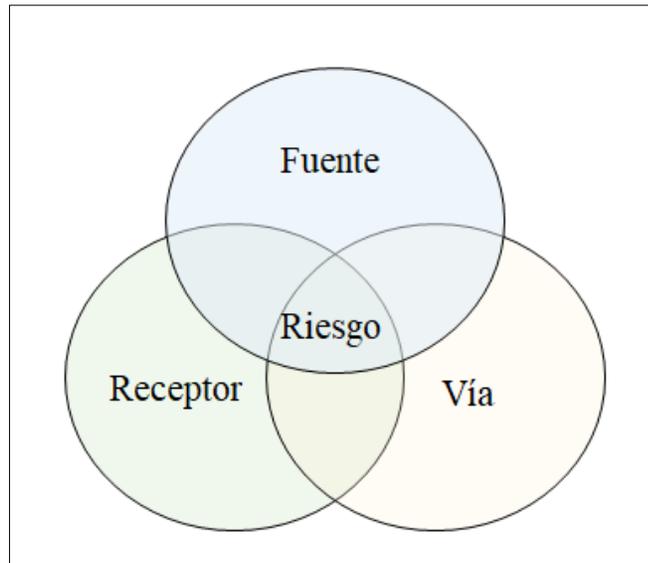


Figura 2.2 Elementos del riesgo
Nota: Adaptado de MAVDT, 2007.

La primera etapa se corresponde con la formulación del problema o la identificación de los compuestos de interés y cuáles son sus efectos adversos. La segunda y tercera etapa son la evaluación de la toxicidad y de la exposición respectivamente y la cuarta etapa es la caracterización del riesgo con los resultados de las etapas anteriores.

Cuando la evaluación de riesgos da como resultado valores no tolerables se plantea la necesidad de restaurar o remediar el mismos. (www.geodataargentina.com.ar).

Todo el proceso incluyendo la planificación, la evaluación, el manejo de los riesgos y la comunicación entre todas las partes involucradas es lo que se denomina análisis de riesgo.

2.2.7 La Biorremediación

La biorremediación es una técnica de recuperación de sitios impactados, que utiliza tecnologías las cuales estimulan la biodegradación del contaminante por procesos biológicos (Pucci 2010). En ella se utiliza microorganismos, hongos, plantas o las enzimas

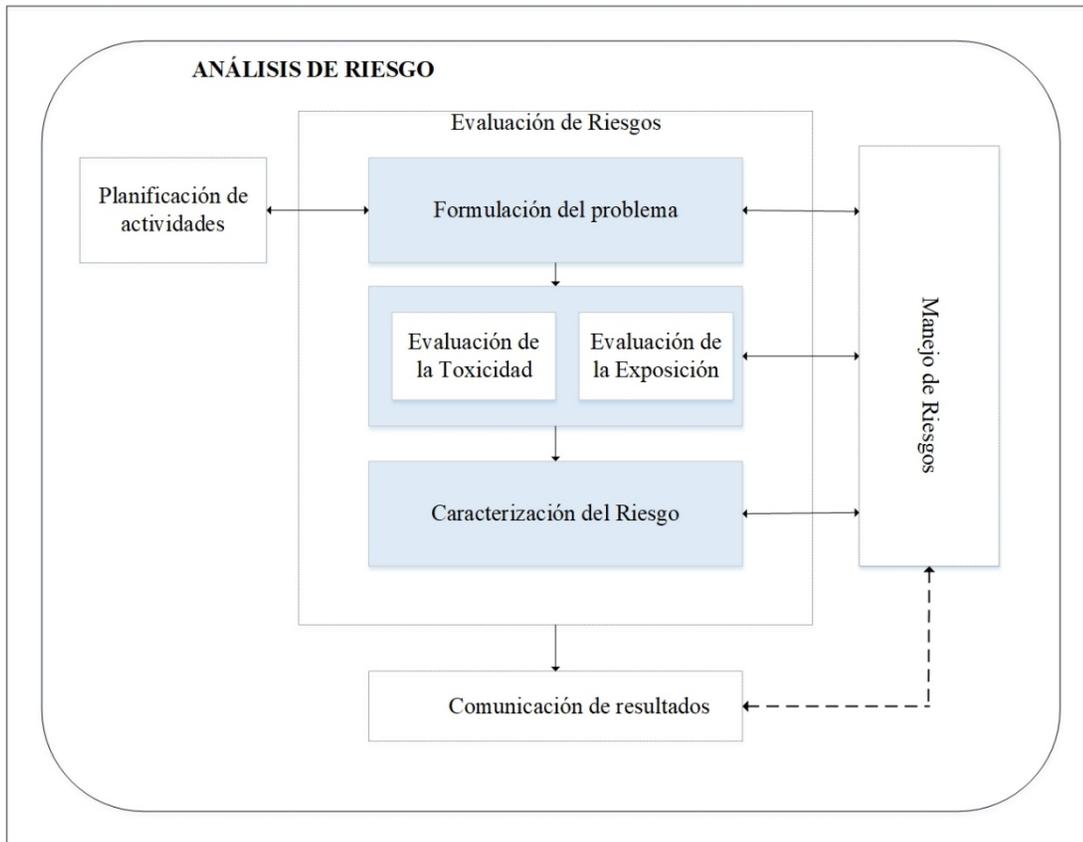


Figura 2.3 Análisis de riesgo

Fuente: Adaptado de USEPA 1998, Rihm y Anacona 2004

derivadas de ellos para retornar un medio ambiente alterado con contaminantes a su condición natural. Este proceso puede ser llevado a cabo por la micro biota autóctona de la zona contaminada o por microorganismos adicionados, en ambos casos, se logra la transformación de sustancias peligrosas en sustancia menos tóxicas. La selección de una tecnología de biorremediación está condicionada por factores como: el tipo de microorganismos presentes en el medio ambiente, las condiciones del área contaminada: temperatura, oxígeno, humedad, energía, la concentración y toxicidad de los contaminantes entre otros.

2.2.8 La georreferenciación

La georreferenciación es el posicionamiento con el cual se define la localización de un objeto en el espacio, representándolo mediante un punto, un vector, un área o volumen, mediante un sistema de coordenadas y datum definido.

El uso de la cartografía para representar la ubicación espacial y georreferenciada de datos, ya sea que provengan del medio físico: geología, geomorfología, edafología; del medio biológico: clima, vegetación o fauna; o el medio socioeconómico y la disponibilidad y avances de sistemas informáticos nos lleva a acudir al uso de los mismos para el manejo y representación de datos en forma de mapas. Cuando se especifica que un dato está “espacialmente referenciado”, significa que todos los elementos que lo conforman tienen una expresión espacial. Por ejemplo, una parcela de terreno, una carretera, un lago, un río, un asentamiento poblacional y que puede ser georreferenciada en el espacio con respecto a un sistema de coordenadas determinado. Para determinar la ubicación en el espacio, se requiere de un dispositivo que permita ubicar con precisión la ubicación de dichos puntos, para ello se utilizan los sistemas de posicionamiento global o GPS, por sus siglas en inglés. (Global position systems).

2.2.9 Sistema de posicionamiento global (GPS).

Los GPS son sistemas utilizados para determinar la ubicación de puntos sobre la superficie terrestre, utilizando satélites.

El sistema de posicionamiento global (GPS), es un servicio propiedad de los Estados Unidos de América, que proporciona a los usuarios información sobre posicionamiento, navegación y cronometría de forma gratuita e ininterrumpida a usuarios civiles en todo el mundo. Este sistema está constituido por tres segmentos: el segmento espacial, el segmento de control y el segmento del usuario. (www.gps.gov)

El segmento espacial está constituido por una constelación de satélites que transmiten señales unidireccionales a los usuarios que proporcionan la posición y la hora de cada satélite al GPS. Los satélites orbitan alrededor de La Tierra dos veces por día a una altitud de aproximadamente 20.200 km.

El segmento de control está conformado por una red global en tierra de seguimiento y control de todos los satélites, que monitorea sus transmisiones, realiza análisis y envía comandos y datos a la constelación de satélites.

El segmento de los usuarios está formado por los equipos receptores del GPS que recibe las señales de los satélites y los procesa para calcular la posición tridimensional y la hora precisas. En la actualidad hay un sin número de receptores portátiles en diferentes tamaños y marcas a la disposición de los usuarios, para determinar con exactitud su ubicación.

2.2.10 Conceptos básicos Geodesia

La geodesia, es la ciencia que estudia la forma y dimensiones de la Tierra (Jekely, 2006). La geodesia permite la determinación de un punto sobre la superficie terrestre mediante coordenadas: latitud, longitud y altura y plantea modelos para poder representar la complejidad de la superficie terrestre; para ello establece una serie de puntos de referencias denominados vértices geodésicos cuyas coordenadas son conocidas con mucha precisión. Esto permite a su vez, construir las redes geodésicas que permiten ubicar cualquier otro punto cualquiera estableciendo sus coordenadas tomando como base estos puntos conocidos.

El planeta Tierra, debido a su movimiento de rotación, no tiene una forma completamente esférica. Posee un achatamiento en los polos por lo cual no es una esfera perfecta. Por ello el radio del planeta varía dependiendo el punto donde se mida. Esta circunstancia ha permitido modelarla la forma de La Tierra como un elipsoide.

El elipsoide es la forma geométrica que mejor se adapta a la forma real de La Tierra (ver figura 2.4) y por lo tanto la que mejor permite idealizar esta, logrando un mayor ajuste (Olaya 2011).

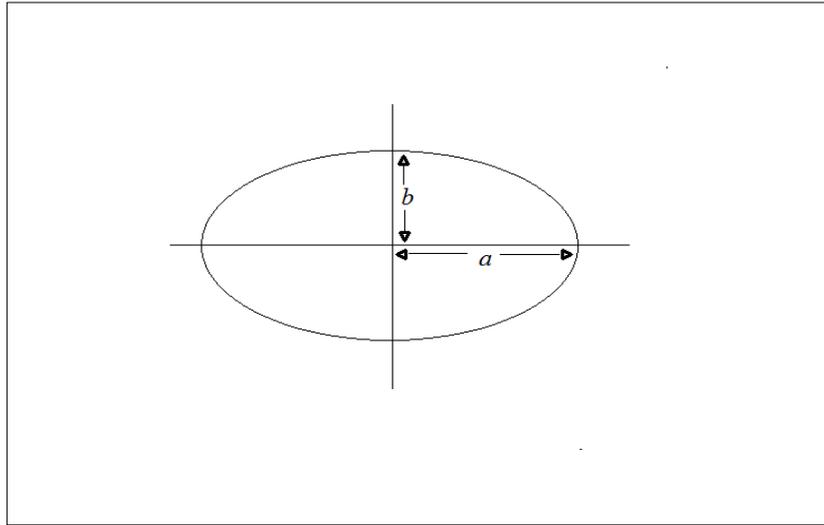


Figura 2.4 Elipsoide

La relación existente entre los dos radios, define el grado de achatamiento del elipsoide. Este factor se calcula mediante la fórmula:

$$\text{Factor achatamiento} = f = \frac{a-b}{a} \quad \text{Ecuación 2.1}$$

Las medidas de los semiejes no son únicas, e históricamente han variado de una zona a otra del mundo, por ello se establecían oficialmente elipsoides en diferentes países o zonas geográficas.

En la tabla No. 2.4, se muestran algunos ejemplos de elipsoides utilizados históricamente y sus parámetros característicos.

Tabla 2.4 Elipsoides de referencia y sus parámetros

Elipsoide (Año)	Semieje mayor a [m]	1/f
Airy (1830)	6377563.396	299.324964
Everest 1956	6377301.243	300.801700
Bessel 1841	6377397.155	299.152813
Clarke 1866	6378206.400	294.978698
Clarke 1880	6378249.145	293.465000
Clarke modificado(1880)	6378249.145	293.4663
International 1924 (Hayford)	6378388.000	297.000000
Krassovski (1940)	6378245.000	298.3
Mercury (1960)	6378166.000	298.3
GRS67 (1967)	6378160.000	298.2471674273
Mercury modificado (1968)	637150.000	298.3
Fisher 1968	6378150.000	298.300000
Australian National	6378160.000	298.250000
South American 1969	6378160.000	298.250000
WGS 66 (1966)	6378145.000	298.25
WGS72 (1972)	6378135.000	298.26
GRS80 (1980))	6378137.000	298.257222101
WGS84 (1984)	6378137.000	298.257223563
TOPEX/Poseidon (1992)	6378136.300	298.257

Fuente: Jekely, (2006).

La otra superficie de referencia es el geoide. El geoide es la superficie teórica de la tierra formada por la unión de todos aquellos puntos que tienen igual gravedad (Fernández, 2001). Es una superficie irregular debido a las diferentes composiciones minerales del interior de la tierra y sus densidades, lo cual ocasiona que, para cada punto de la superficie de la tierra, exista una distancia distinta desde el centro de la misma hasta el punto en el geoide. En la figura 2.5, se muestra una representación gráfica comparativa del elipsoide, el geoide y la superficie de la corteza terrestre.

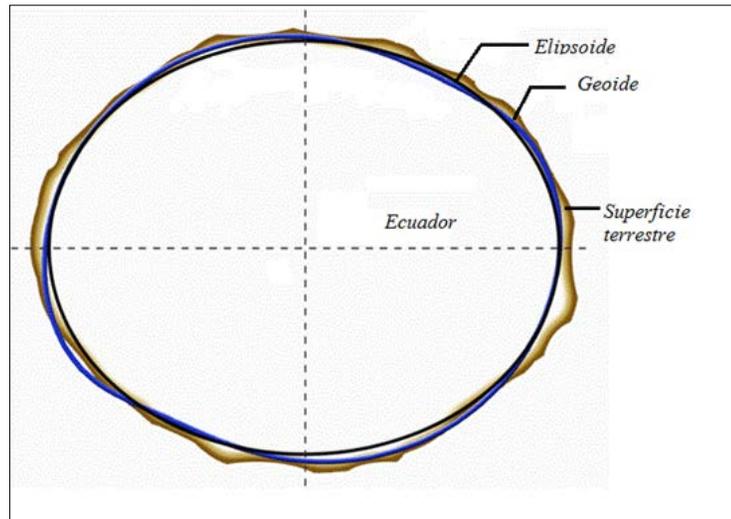


Figura 2.5 Representación gráfica del geoide y el elipsoide

Fuente: Jekely, (2006).

Las diferencias entre el elipsoide y el geoide se denominan alturas geoidales y se pueden ilustrar sus diferencias en la figura 2.6.

Datum Geodésico: en geodesia, un datum es un conjunto formado por una superficie de referencia (elipsoide) y un punto en la superficie terrestre con el cual se enlaza este al geoide. El punto de enlace se denomina punto astronómico fundamental y allí el elipsoide es tangente al geoide. La altura geoidal allí es igual a cero. Para un mismo elipsoide, pueden utilizarse distintos puntos fundamentales, que darán lugar a distintos datum y a distintas coordenadas de un mismo punto.

Existen cientos de datum de referencia, desarrollados para referenciar puntos en determinadas áreas y convenientes para esa área. Los datums contemporáneos están diseñados para cubrir áreas más grandes.

La unificación del sistema geodésico se hizo necesaria en el año 1950, debido a que las mejoras en las comunicaciones y el comercio internacional, hizo necesario contar

con mapas globales para la navegación, tanto marítima como aérea dejando la imposibilidad de usos de los sistemas locales existentes. Así nació el sistema geodésico mundial.

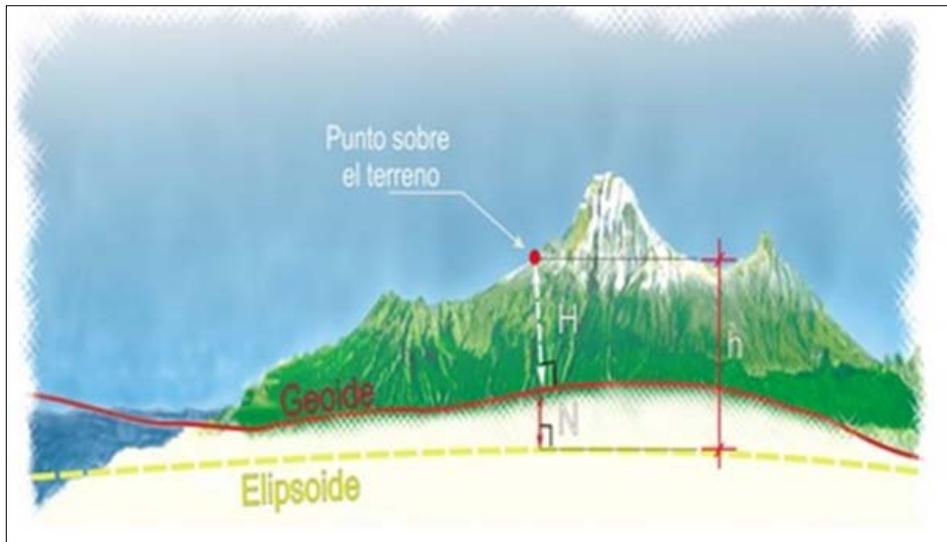


Figura 2.6 Elipsoide y geode de referencia

Fuente: www.inegi.org.mx

El Sistema Geodésico Mundial 1984 (World Geodetic System 84, WGS84), es un sistema de coordenadas geográficas mundial que permite localizar cualquier punto de La Tierra por medio de tres unidades dadas. Es el datum estándar por defecto para coordenadas en los dispositivos de posicionamiento global (GPS) comerciales. Los usuarios de GPS deben chequear el datum utilizado ya que un error puede suponer una traslación de las coordenadas de varios cientos de metros. El WGS84, utiliza como eje Z el polo del servicio internacional de rotación de La Tierra I.E.R.S. por sus siglas en inglés (International Earth rotation service), como eje X el meridiano 0 ó meridiano de Greenwich convencional definido por el I.E.R.S y el eje y formando la tripleta dextrográfica. Su origen coincide con el geocentro. En la práctica el GRS80 y el WGS84 se pueden considerar idénticos. (Martin, 2010).

2.2.11 Sistemas de coordenadas.

Para poder establecer la localización de un punto sobre la superficie terrestre se definen los sistemas de coordenadas. Las coordenadas geográficas son un sistema de coordenadas que toma como base la geometría esférica de la tierra y se definen mediante latitud y la longitud.

La latitud (φ), es el ángulo formado por la línea que une el centro de la tierra con un punto determinado en su superficie y el ecuador. (Ver figura 2.7). La latitud varía entre 0 y 90 grados y puede ser “norte” si el punto se encuentra al norte del ecuador o “sur” si se encuentra al sur del mismo. La latitud es 0 en el ecuador.

La longitud (λ) es el ángulo formado por el plano que contiene al punto en consideración y que pasa por los dos polos y el plano que pasa por el meridiano “0” o de Greenwich y por los dos polos (Ver figura 2.7).

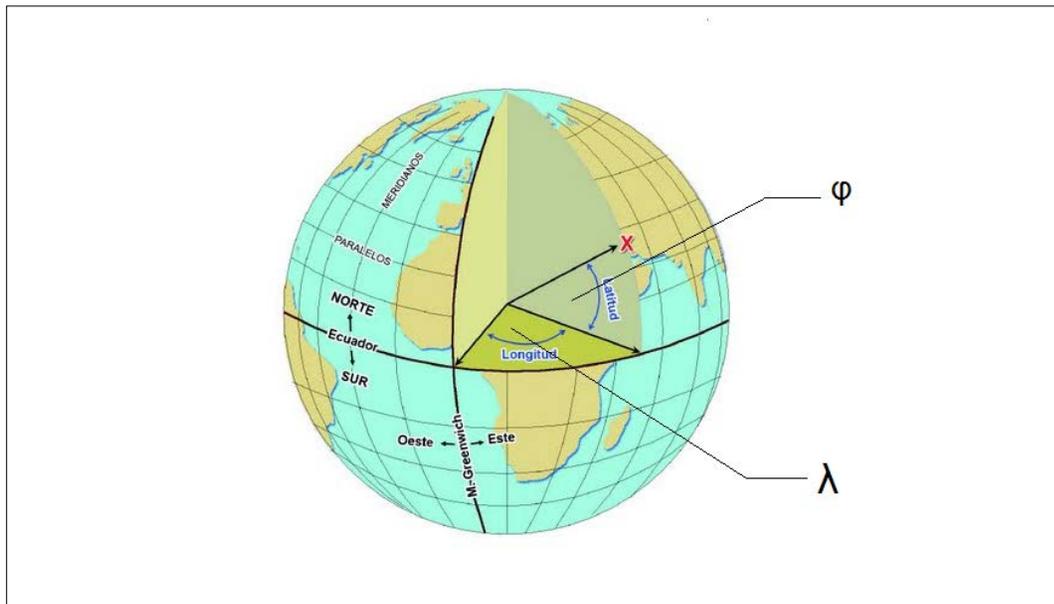


Figura 2.7 Coordenadas geográficas: latitud y longitud

Fuente: maralboran.org/wikipedia.

2.2.12 Proyecciones cartográficas

Para poder realizar cartografía y emitir mapas, es necesario establecer una metodología para poder representar las coordenadas del punto del sistema de coordenadas esféricas a una superficie plana. Para lograr eso se utilizan las proyecciones cartográficas.

Una proyección cartográfica es la correspondencia matemática biunívoca entre los puntos de una esfera o elipsoide y sus transformados en un plano (Olaya 2011). A cada par de coordenadas geográficas (φ, λ) , le hace corresponder un par de coordenadas cartesianas (x, y) , según:

$$x = f(\varphi, \lambda); y = f(\varphi, \lambda) \quad \text{Ecuación 2.2}$$

Las proyecciones se clasifican según la superficie donde se proyectan los puntos (Olaya, 2014), (Fernández, 2001):

- Planas o azimutales: la superficie desarrollable es directamente un plano y normalmente se utilizan para superficies pequeñas donde no hay efecto de la geometría esférica de La Tierra. Los puntos son representados, vistos desde su perpendicularidad (Fernández, 2001; pág.21)
- Cónicas: la superficie es un cono situado en forma tangente o secante a la superficie del elipsoide. Ejemplos: la proyección cónica simple, proyección cónica conforme de Lambert y proyección cónica múltiple. (Olaya, 2014).
- Cilíndricas: la superficie desarrollable es un cilindro que se sitúa tangente al ecuador (proyección normal o simple). También puede situarse secante y ser tangente a los meridianos (proyección transversa) o a otros puntos en cuyo caso será una proyección oblicua. Ejemplo de estas proyecciones: la proyección de

Mercator, la trasversa de Mercator, la cilíndrica de Miller o la proyección cilíndrica holográfica de Lambert.

Para elegir una proyección con la cual trabajar se deben evaluar los requerimientos particulares, debido a que algunas proyecciones son más adecuadas para trabajar en unas zonas que en otras, de allí la gran variedad existente para diversas necesidades.

En la actualidad una de las proyecciones más extendidas en todos los ámbitos es la proyección Universal Transversa de Mercator, la cual origina el sistema de coordenadas Universal Transverso de Mercator (UTM).

El sistema UTM, es un sistema de coordenadas desarrollado por el ejército de los Estados Unidos (1940), que permite cartografiar la mayor parte de la superficie terrestre. Toma como base la proyección cartográfica universal de Mercator. (Ver figura 2.8).

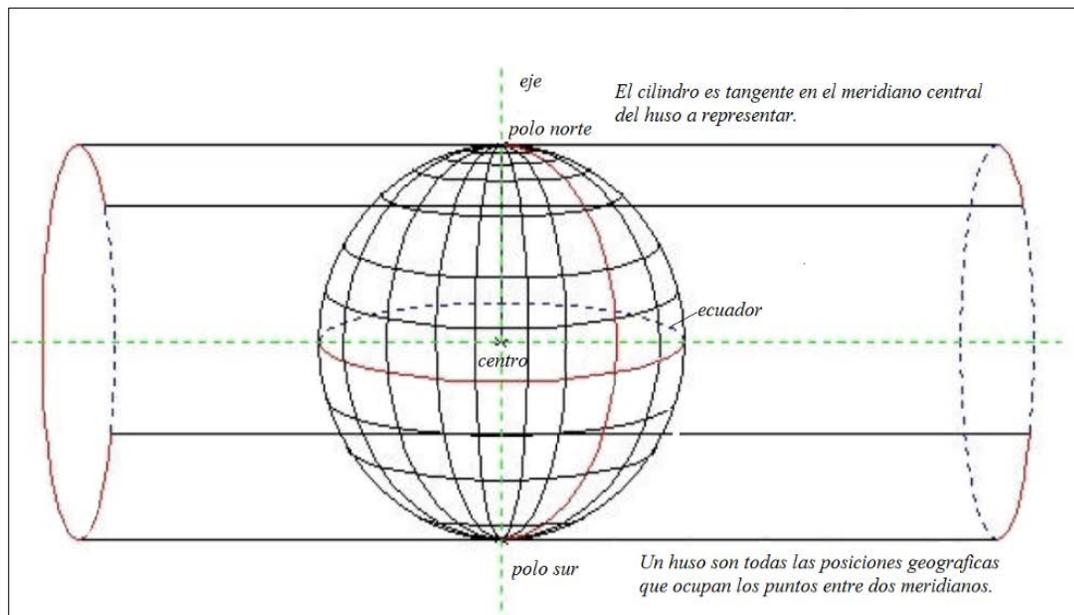


Figura 2.8 Proyección transversal Mercator

Fuente: ingecivil.blogspot.com

El sistema UTM divide a La Tierra en una serie de zonas rectangulares mediante una cuadrícula y se aplica una proyección y unos parámetros geodésicos en cada una de las zonas. En la actualidad se utiliza el elipsoide WGS84 en exclusiva. En este sistema las coordenadas de un punto se expresan en función a la posición relativa del mismo en la cuadrícula UTM donde se encuentre. Las cuadrículas UTM tiene 60 husos numerados del 1 al 60, y cada uno de ellos abarca 6 grados de longitud medidos en sentido este y van desde el antimeridiano de Greenwich (180 grados) (Fernández, 2001). Ver figura 2.9.

En latitud, cada huso se divide en 20 bandas que van desde los 80 grados sur hasta los 84 grados norte y se codifican con las letras desde la C hasta la X sin usar la “I”, la “O”, ni la “Ñ”. Cada zona abarca 8 grados de latitud, excepto la zona “X” que cuenta con 12 grados. Las bandas “C” hasta la “M”, se encuentran en el hemisferio sur, las bandas “N” hasta la “X” se encuentran en el hemisferio norte.

Las zonas UTM, se identifican con un número y una letra y se expresan en metros. Expresan la distancia entre el punto a ubicar y el origen de la zona UTM en concreto. El origen de la zona se sitúa en el punto de corte entre el meridiano central de la zona y el ecuador. Se considera que el origen no tiene una coordenada X de 0 metros, sino de 500.000, para evitar la aparición de números negativos, ya que ninguna zona tiene un ancho mayor de 1.000.000 metros (el ancho es máximo en las zonas cerca del ecuador, siendo de alrededor de 668 kilómetros). De igual modo, cuando se trabaja en el hemisferio sur (donde las coordenadas “Y” serían siempre negativas), se considera que el origen tiene una coordenada Y de 1.000.0000 metros, lo cual hace que todas las coordenadas referidas a él sean positivas (Figura 2.10). No se recomienda el uso del sistema UTM para las zonas polares porque se introducen demasiadas distorsiones. (Fernández, 2001). Para estos casos se utiliza el sistema universal polar estereográfico (Universal Polar Stereo graphic UPS).

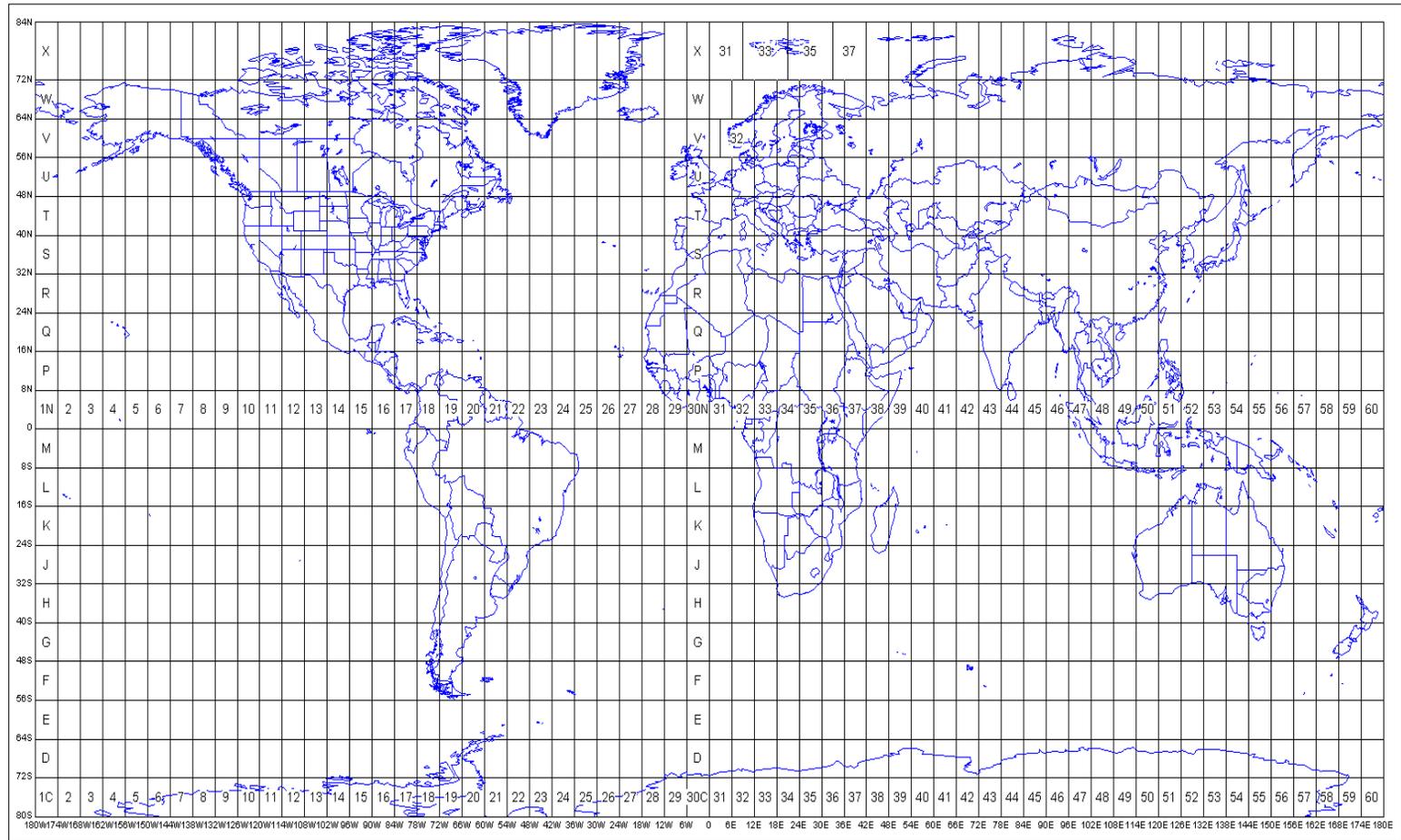


Figura 2.9 Sistema de coordenadas Universal Transverso de Mercator (UTM)

Fuente : Librería de imágenes ArcGis.

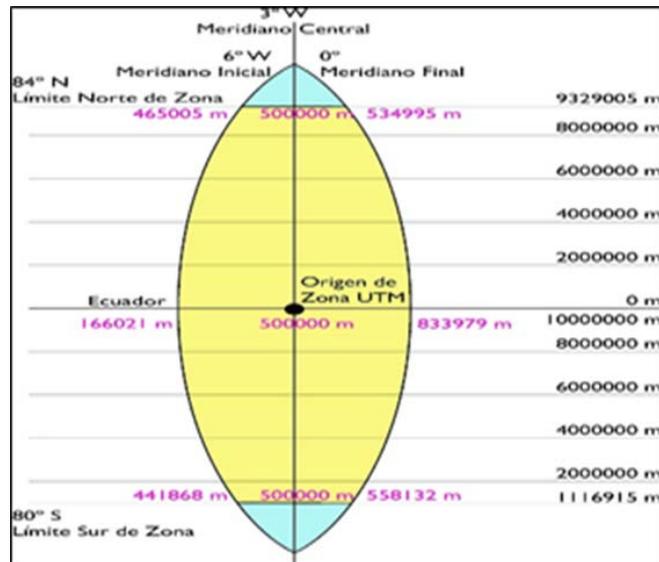


Figura 2.10 Detalle de una zona UTM

Fuente: www.accion4x4.es/coordenadas.html

En el sistema de coordenadas UTM, Venezuela se encuentra ubicada en las zonas 18P, 19P, 20P, 19N y 20N (Figura 2.11). La zona en evaluación, se encuentra en la 19N. Ver figura 2.12.



Figura 2.11 Ubicación de la república Bolivariana de Venezuela en el sistema de coordenadas UTM. Fuente: Google Earth



Figura 2.12 Detalle de la ubicación de la república Bolivariana de Venezuela en el sistema de coordenadas UTM. Fuente: Google Earth

2.2.13 Sistemas de información geográfica (SIG).

En la actualidad es común el uso de los Sistemas de Información geográficos para aplicaciones ambientales.

Un sistema de información geográfica (SIG), es un sistema que integra tecnología informática (hardware y software), personas e información geográfica y cuya principal función es capturar, analizar, modelar, almacenar, editar, visualizar y representar datos espacialmente georreferenciados para resolver problemas de planeamiento y gestión. (Olaya 2014). Todos los elementos del sistema tienen una expresión espacial que puede ser georreferenciada en el espacio con respecto al origen de un sistema de coordenadas determinado, para almacenar en un mismo ambiente en forma de capas la información para su ordenamiento y análisis. (Cohen, 1981).

En términos generales los SIG, son bases de datos automatizadas referenciadas geográfica o espacialmente que permiten incorporar procesos de análisis de la información (Sandía y Henao 2001). Cada dato que conforma el banco de referencia se corresponde

con la característica del comportamiento de un elemento ambiental en un territorio delimitado, lo cual permite incorporar bien sea a través de programación dentro de la base de datos y/o consultas espaciales dentro del sistema de información geográfica, el proceso normal de análisis y procesamiento de dichos elementos. Como resultado del proceso de análisis, se generan mapas que muestran gráficamente los resultados obtenidos.

Los sistemas de información geográfica permiten manejar múltiples variables referidas al mismo espacio, combinándolas de múltiples maneras, lo cual amplía las posibilidades de análisis que brindan los mapas convencionales, además de facilitar su almacenamiento y actualización. La información es organizada en forma de capas homogéneas de información establecidas en diferentes niveles (ver figura 2.13), lo que permite poder accederla de forma parcial o integral. La vinculación existente entre los datos y el espacio y sus interrelaciones proporcionan la gran capacidad de análisis de estos sistemas.

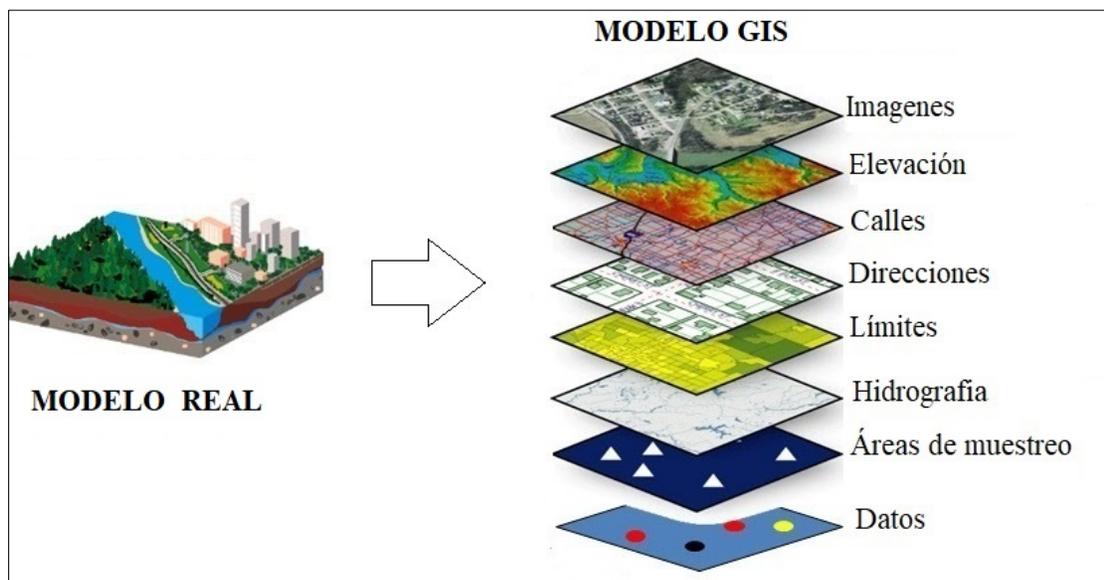


Figura 2.13 Ejemplo de un modelo de sistema de información geográfica.

Nota: Adaptado de ArcGis

- **Componentes de un sistema de información geográfica**

Se componen de cinco elementos principales: datos, métodos, software, hardware y personas. Ver figura 2.14.

- Los datos son los componentes necesarios que contienen toda la información geográfica y que justifican la existencia del SIG.
- Los métodos, constituyen las formulaciones y las metodologías a aplicarse sobre los datos para hacer los análisis y obtener los productos deseados.
- El software es la aplicación informática que trabaja con los datos e implementa los “métodos”.
- El hardware es el equipamiento requerido para poder ejecutar el “software”.
- Las personas son las encargadas de diseñar y utilizar el software, siendo el motor del sistema SIG.

Los SIGs pueden trabajar con datos en diferentes sistemas de coordenadas y con diferentes proyecciones cartográficas, sin embargo, al trabajar con diferentes cartografías y tener la necesidad de unificar la información, cuenta con las herramientas para poder realizar operaciones sobre los datos y así podemos distinguir dos clases de operaciones que se puede realizar con las coordenadas:

- **Conversión de coordenadas:** Los sistemas de origen y destino comparten el mismo datum. Es una transformación exacta y se basa en la aplicación de fórmulas establecidas que relacionan ambos sistemas.
- **Transformación de coordenadas:** El datum es distinto en los sistemas de origen y destino.

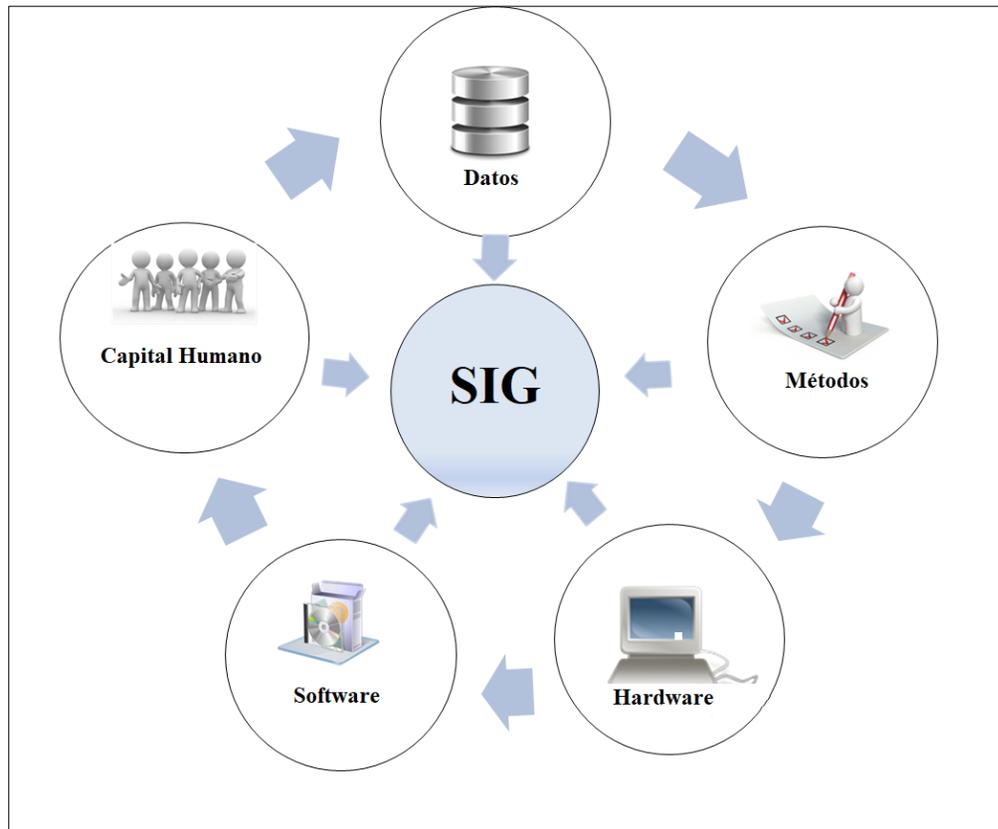


Figura 2.14 Componentes de un sistema de información geográfica

Los SIGs, cuentan con las herramientas necesarias para efectuar los cambios de coordenadas cuando sea requerida, de manera de mantener la integridad de la información. También poseen las herramientas necesarias para realizar el análisis espacial de datos.

En el anexo E, se identifican algunos de los sistemas de información geográficos disponibles en el mercado.

2.2.14 Geoestadística

Es la rama de la estadística que trata fenómenos espaciales (Journel y Huijbregts, 1978), combinando métodos estadísticos y probabilísticos para analizar la variabilidad

espacial (Bardossy, n.d). Ofrece una manera de describir la continuidad espacial, rango distintivo de muchos fenómenos naturales y proporciona adaptaciones de las técnicas clásicas de regresión para tomar ventaja de esta continuidad (Isaaks y Srivastava, 1989).

Los métodos geoestadísticos tuvieron su origen en la geología y la minería, con los estudios de Daniel Krige (1951). Este fue un geólogo e ingeniero en minas sudafricano considerado el padre del uso del concepto de geoestadística al utilizarlos para evaluar la distribución de los recursos minerales en las minas de oro. De allí la denominación de kriging, a la metodología utilizada para aplicar las técnicas de evaluación. Sin embargo, fue Matheron (1963), quien introdujo el concepto de variable regionalizada al considerar que los datos están atados en el espacio geográfico de manera que presenta una estructura de correlación (Montero y Larraez, 2004). Esta estructura de correlación debe ser determinada para lograr la correcta aplicación del método kriging. (Giraldo, n.d).

2.2.14.1 Continuidad espacial

Como se mencionó previamente, la geoestadística ofrece una manera de describir la continuidad espacial en un conjunto de datos. En las ciencias geológicas y geográficas los datos más cercanos, tienen más probabilidad de tener similitudes que aquellos que están separados (Isaaks y Srivastava, 1999). Para evaluar esta continuidad se utilizan los diagramas de dispersión- h . Estos son construidos con pares de datos, cuyas ubicaciones están separadas una distancia h en una dirección determinada. La ubicación como la distancia de separación de los puntos se pueden describir con un vector donde las letras “x” e “y”, definen las coordenadas del punto. En la figura 2.15, se muestra un ejemplo de un diagrama de dispersión h . Las figuras muestran que tan continuos son los datos sobre ciertas distancias en particular. Si los datos son muy similares, los puntos se agruparán alrededor de la línea $x = y$, a 45 grados pasando por el origen.

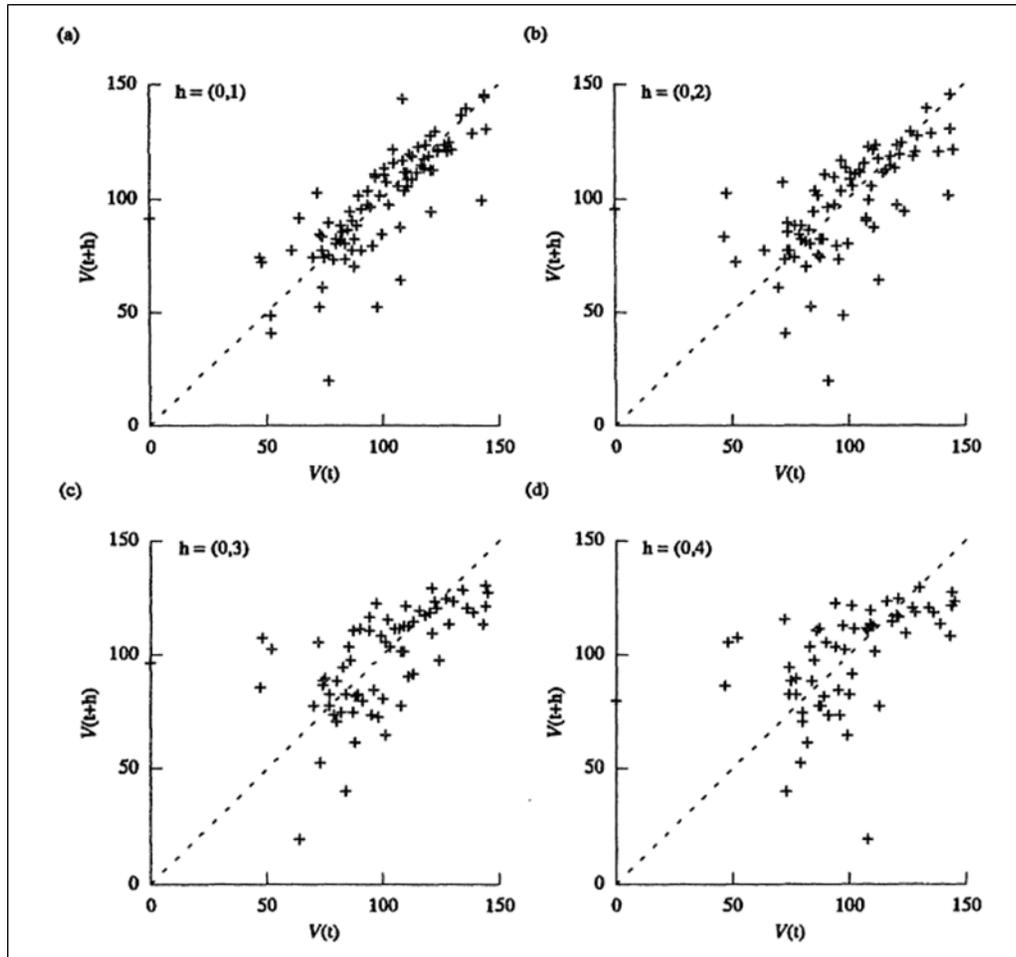


Figura 2.15 Ejemplos de diagramas de dispersión-h, para cuatro distancias de separación en sentido norte

Fuente: Isaaks y Srivastava, 1999.

La dispersión de la nube de puntos, da indicación del coeficiente de correlación. A medida que la nube de punto se expande más el coeficiente de correlación disminuye. La relación entre el coeficiente de correlación y el diagrama de dispersión-h se denomina función de correlación o correlograma $\rho(h)$. La relación entre la covarianza y el diagrama de dispersión-h, se denomina función de covarianza $C(h)$. La relación entre

el momento de inercia de un diagrama de dispersión- h y h se denomina semivariograma $\gamma(h)$.

En la practica la construcción del diagrama de dispersión- h , no esta tan sencilla, debido a que usualmente no se cuenta con una gran cantidad de pares de datos que estén separados exactamente una distancia h . Por ello, se debe permitir una tolerancia de h , lo cual permite utilizar las parejas que están dentro de una distancia $h \pm \text{tolerancia}$.

Aunque el diagrama de dispersión- h proporciona mucha información sobre la continuidad espacial de las variables, se utilizan las funciones de correlación, covarianza y variograma para describir como la continuidad espacial cambia en función de la distancia y la dirección, sin embargo, el variograma es la opción más usada tradicionalmente.

2.2.14.2 Variable regionalizada

Es una variable medida en el espacio de forma que presenta una estructura de correlación. Es un proceso estocástico con dominio contenido en un espacio euclidiano dimensional R^d , $\{Z(x): x \in D \subset R^d\}$, si $d = 2$, $Z(x)$ puede asociarse a una variable medida en el punto x del plano. (Díaz, 1993), (Giraldo, nd.).

En cada localización x , $Z(x_i)$ es una variable aleatoria. Para todo conjunto de puntos $\{x_1, \dots, x_n\}$ las variables aleatorias $\{Z(x_1), \dots, Z(x_n)\}$ están ligadas por un entramado de correlaciones espaciales responsables de los valores que toma. (Montero y Larraez, 2004). Para cada x en el conjunto de índices D , x representa las coordenadas planas o geográficas de ese punto y $Z(x)$, la variable medida en cada una de ellas. (Giraldo, n.d.).

2.2.14.3 Momentos de una variable regionalizada

Sea $\{Z(x): x \in D \subset R^d\}$ el proceso estocástico que define la variable regionalizada. Para cualquier n puntos x_1, x_2, \dots, x_n , el vector aleatorio $\vec{Z}(x) = [Z(x_1), Z(x_2), \dots, Z(x_n)]^T$, está definido por su función de distribución conjunta

$$F[z_1, z_2, \dots, z_n] = P[Z(x_1) \leq z_1, Z(x_2) \leq z_2, \dots, Z(x_n) \leq z_n] \quad \text{Ecuación 2.3}$$

Se pueden establecer los siguientes momentos esperados:

$$E(Z(x_i)) = m(x_i) \quad \text{Ecuación 2.4}$$

$$V(Z(x_i)) = E[Z(x_i) - m(x_i)]^2 = \sigma_i^2 \quad \text{Ecuación 2.5}$$

$$C(Z(x_i), Z(x_j)) = E[Z(x_i) - m(x_i)][Z(x_j) - m(x_j)] \quad \text{Ecuación 2.6}$$

$$\gamma(Z(x_i), Z(x_j)) = \frac{1}{2} E[Z(x_i) - Z(x_j)]^2 \quad \text{Ecuación 2.7}$$

La ecuación 2.5 define la función de autocovarianza y la 2.6, la función de semivarianza.

2.2.14.4 Estacionariedad

Una variable regionalizada es estacionaria, si su función de distribución conjunta es invariante respecto a cualquier traslación de un vector h ; o sea la función de distribución del vector aleatorio $\vec{Z}(x) = [Z(x_1), Z(x_2), \dots, Z(x_n)]^T$ es idéntica al vector aleatorio $\vec{Z}(x) = [Z(x_1 + h), Z(x_2 + h), \dots, Z(x_n + h)]^T$ para cualquier h . La teoría geoestadística se basa en los momentos descritos. (Giraldo, n.d.).

2.2.14.5 Estacionariedad de segundo orden

Sea $\{Z(x): x \in D \subset R^d\}$ una variable regionalizada definida en el dominio D contenido en R^d , se dice que $Z(x)$ es estacionario de segundo orden si se cumple:

- $E[Z(x)] = m, k \in R, \forall x \in D \subset R^d$ El valor esperado de la variable aleatoria es finito y constante para todo punto en el dominio.
- $COV[Z(x), Z(x+h)] = C(h) < \infty$. Para a toda pareja $\{Z(x), Z(x+h)\}$, la covarianza existe y es función única del vector de separación h .

Cuando una variable regionalizada es estacionaria, el valor promedio de la variable no muestra una tendencia definida en alguna dirección. Una variable regionalizada será no estacionaria si su esperanza matemática no es constante, esto es si $E[Z(x)] = m(x)$. (Giraldo, n.d.).

2.2.14.6 El semivariograma experimental

La tasa de cambio promedio de una variable regionalizada se puede definir calculando la semivarianza. Para el cálculo de la semivarianza de los datos se utiliza la fórmula:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad \text{Ecuación 2.8}$$

Donde γ , es la varianza n , es el número de pares de puntos de muestreo separados una distancia h ; $Z(x_i)$, es el valor de la variable en un punto y $Z(x_i + h)$ es el valor de la variable a una distancia h . Con esta fórmula se calcula la diferencia cuadrada entre los valores de las ubicaciones (Burroughs and McDonell, 1998), (Henríquez y Viloria 1999).

La gráfica de $\gamma(h)$ vs. h se denomina como semivariograma experimental o empírico. La figura 2.16, muestra un ejemplo de uno de ellos.

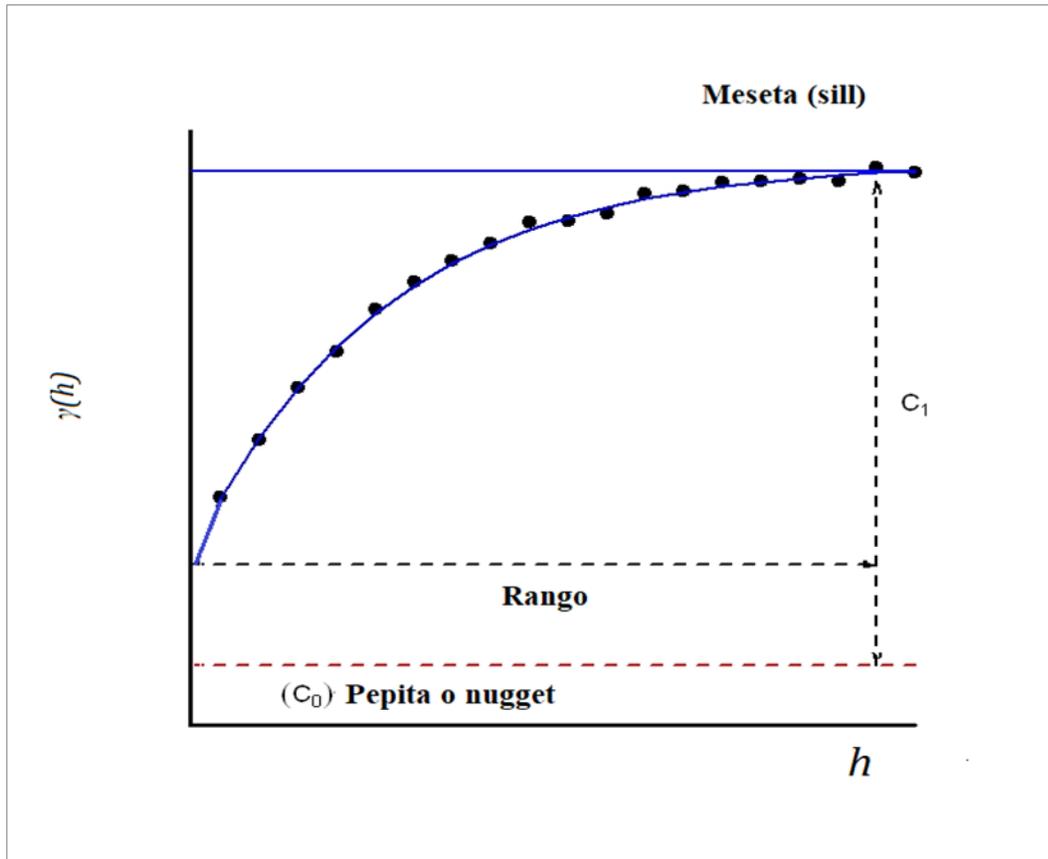


Figura 2.16 Ejemplo de un semivariograma donde se muestra el rango, el nugget C_0 y el umbral $(C_0 + C_1)$. Fuente: Li y Heap, 2008.

Toda la información referente a la variable regionalizada se encuentra en el mismo:

- a) El rango, define el alcance o la zona de influencia de la dependencia espacial. Es la zona de influencia de la variable regionalizada.
- b) La meseta o sill, es el umbral de máxima variación y está determinado por $C_0 + C_1$. El alcance determina la superficie que representa a la muestra.
- c) C_0 define el efecto pepita o nugget, que muestra el comportamiento del semivariograma en el origen.

El comportamiento del semivariograma en diferentes direcciones es lo que se conoce con el nombre de anisotropía. (Henríquez y Vilorio, 1999), (Journel y Hui-bregts, 1978).

2.2.15 Análisis espacial

Análisis espacial es el estudio cuantitativo de todos los fenómenos que se presentan en el espacio. De allí la importancia clave de la posición, la superficie, la distancia y la interacción a través del espacio. (Olaya 2014).

2.2.15.1 Tipos de análisis espacial

Existen diferentes metodologías para realizar el análisis espacial de datos dependiendo de la información que se quiere generar. Los procedimientos para abordarlos pueden ser muy diversos, entre otros se pueden identificar los siguientes:

- Consulta espacial
- Análisis topológico
- Mediciones
- Combinación de capas
- Transformaciones
- Análisis de superficies
- Estadística descriptiva
- Inferencia
- Toma de decisiones y optimización
- Modelización

Para el proceso de análisis de datos espaciales, se debe considerar ciertas particularidades de los mismos. Estos presentan una estructura, una escala, son susceptibles al efecto de bordes y otros problemas derivados como la unidad de área modificable.

También es importante las auto correlaciones existen entre los datos porque estas pueden condicionar la metodología de análisis a emplear. Otras relaciones que se pueden presentar son relaciones topológicas, relaciones de distancia, relaciones de orientación, entre otras.

2.2.15.2 Estadísticas espaciales

Los datos espaciales pueden ser analizados estadísticamente como cualquier serie de datos. Por ello, se define la estadística espacial como un conjunto de metodologías apropiadas para el análisis de datos que corresponden a la medición de variables aleatorias en diversos sitios o puntos del espacio. Entre estas metodologías se encuentran: medidas centro gráficas, análisis estadísticos de líneas, análisis de patrones de puntos, autocorrelación espacial, interpolación, técnicas de agrupación o regresiones espaciales. Por su importancia en el desarrollo metodológico del presente trabajo, se explicará en detalle la metodología de la interpolación.

2.2.15.3 La interpolación

La interpolación es un proceso por el cual se define un valor en un punto cualquiera a partir de los valores conocidos en algunos puntos dados. Para variables continuas, el valor del punto variable, resulta de una suma de valores ponderados de las variables en los puntos conocidos. La forma estándar, para variables continuas, consiste en hacer una suma de valores ponderados:

$$Z(x) = \sum_{i=1}^n \lambda_i * z(x_i) \quad \text{Ecuación 2.9}$$

El valor z en el punto variable x_i , se calcula asignando a cada punto fijo, un peso λ_i que depende de la posición del punto variable. Normalmente se pretende que el peso de cada punto esté en relación inversa con la distancia al punto móvil, de ese modo el valor estará más influenciado por los puntos más cercanos. Pero hay muchas formas de definir los pesos. Es justamente, la selección de pesos la que define el método de interpolación.

El número de métodos distintos es muy amplio, y es importante reseñar que la bondad o no de uno u otro va ligada no solo al método en sí, sino también a la variable interpolada y al uso que se dé posteriormente a la capa resultante (Esri®).

En general, cualquier variable recogida mediante muestreo puede ser el punto de partida para la aplicación de dichos métodos. Existen muchos métodos de interpolación distintos, entre los que cabe destacar los siguientes por su implementación habitual en los sistemas de información geográficos:

- Vecino más cercano.
- Ponderación por distancia.
- Ajuste de polinomios.
- Curvas adaptativas.
- Kriging

2.2.15.4 Elección del método adecuado de interpolación.

Existen muchos métodos y/o variaciones de ellos. No existe una metodología establecida para determinar cuál es el más adecuado en la aplicación seleccionada. Se deben considerar diversos factores (Li y Heap, 2008). Entre ellos se encuentran:

- La característica de la variable a interpolar.
- Las características de la superficie a interpolar.

- La calidad de los datos de partida.
- El rendimiento de los algoritmos
- El conocimiento de los métodos.
- El uso que se le dará a la capa resultante.

2.2.15.5 Validación del método

Algunos métodos permiten hacer una estimación de error para los puntos generados. Otro método de validación, es reservar algunos puntos del set de datos para validación. Sin embargo, esta metodología solo puede ejecutarse si el juego de datos disponible es muy grande y preciso. Si no se dispone de datos de validación y el conjunto de puntos es muy reducido, se puede realizar una validación cruzada, la cual consiste en calcular por interpolación puntos en cada una de las coordenadas de los puntos de muestreo, empleando en cada caso los puntos restantes.

2.3 Marco legal

Existen diferentes normativas legales que se deben cumplir como parte de los tópicos de la presente investigación.

En lo referente al medio ambiente, la Constitución de la República Bolivariana de Venezuela, gaceta oficial No. 5.453 extraordinaria del 24 de marzo de 2000, establece en el artículo 127: “el deber de proteger el ambiente para su beneficio y el de las generaciones futuras, de allí la necesidad de controlar todas las actividades antrópicas susceptibles de degradar el mismo”. Igualmente establece en su artículo 129: “la obligación de conservar el equilibrio ecológico, de permitir el acceso a la tecnología y la transferencia de la misma en condiciones mutuamente convenidas y de restablecer el ambiente a su estado natural si éste resultare alterado, en los términos que fije la ley”.

Esto es el marco para la aplicación de la metodología de biorremediación y su aplicación a zonas impactadas por derrames de hidrocarburos.

En cuanto a los niveles de hidrocarburos permisibles a nivel del suelo, el decreto 2635 gaceta oficial extraordinaria No. 5245 del 3 de agosto de 1998, (Anexo A) que contiene las normas para el control de la recuperación de materiales peligrosos y el manejo de los desechos peligrosos en su artículo 49, establece las condiciones para la práctica de confinamiento en el suelo de desechos peligrosos generados por la explotación y producción de petróleo y lo niveles de mezcla/suelo tolerables para dicha práctica. Adicionalmente en el artículo 50, establece las condiciones y los niveles tolerables de la mezcla suelo/desecho para utilizar la práctica de esparcimiento en suelos.

En lo referente a geodesia y cartografía, la ley de geografía, cartografía y catastro nacional (LGCCN) publicada en gaceta oficial No. 36.920 del 28 de marzo de 2000, regula la formulación, ejecución y coordinación de las políticas y planes relativos a la geografía y cartografía. En su artículo 11, establece la obligatoriedad de toda persona en el territorio nacional que realice levantamientos geodésicos y topográficos de referirse al sistema geodésico nacional de acuerdo a las normas técnicas establecidas por el Instituto geográfico de Venezuela Simón Bolívar (IGVSB). Estas normas técnicas (Ver anexo B), establecen la definición de la Red Geocéntrica Venezolana REGVEN y establece el Datum oficial para Venezuela al Sistema de referencia Geocéntrico para América del Sur (SIRGAS), de la cual forma parte la red Geocéntrica Venezolana REGVEN. Esto por resolución del Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables (N° 10, del 22 de enero de 1.999), publicada el 03 de marzo de 1.999 en la Gaceta Oficial N° 36.653.

2.4 Definición de términos básicos

Estadística espacial: es la reunión de un conjunto de metodologías apropiadas para el análisis de datos que corresponden a la medición de variables aleatorias en diversos sitios de una región.

Geomática: es la ciencia y tecnología utilizada para la recolección, análisis, interpretación, distribución y uso de datos espaciales e información georreferenciada.

Google Earth: es un programa de computadora que representa al planeta Tierra tres dimensiones en base a imágenes satelitales. El utiliza imágenes satelitales, fotografías aéreas y datos de sistemas de información geográfica superponiéndolas en un globo tridimensional. Esto permite a los usuarios ver ciudades y paisajes desde diferentes ángulos y poder explorar el mundo de manera virtual ingresando las direcciones y coordenadas de los puntos de interés. Google Earth puede mostrar varios tipos de imágenes superpuestas en la superficie de la tierra y también es un cliente del servicio de mapas web.

Gravedad API: escala de gravedad específica desarrolla por el Instituto Estadounidense de Petróleo (American Petroleum Institute API) para medir la densidad relativa de diversos líquidos de petróleo, expresada en grados.

Isolínea: curva que conecta puntos en los cuales la función tiene un valor constante.

Proceso estocástico: es un concepto matemático para tratar magnitudes aleatorias que varían en el tiempo. Estas pueden tener su propia función de distribución y estar o no correlacionadas.

Protocolo de investigación: define los objetivos, diseño, metodología, y consideraciones tomadas en cuenta para la implementación y organización de una investigación o experimento científico.

Ráster: en un sistema de información geográfica es una estructura de datos que representan una rejilla rectangular de pixeles o puntos de color. Los modelos ráster son

útiles para almacenar datos que son continuos a través de un área. Cada celda contiene un valor que puede representar la pertenencia a una clase, categoría, una medición, o un valor interpretado.

Radionucleídos: es un nucleído inestable y que por tanto degenera emitiendo radiaciones ionizantes. Se denomina también nucleído radiactivo, radioisótopo o radionúclido.

Red geocéntrica venezolana REGVEN: conjunto de puntos materializados sobre el territorio nacional, cuyas posiciones temporales están definidas y orientadas en un sistema convencional de coordenadas, establecida por técnicas modernas de medición geodésica satelital GPS, lo que produjo un cambio de sistema de referencia desde el Datum local convencional La Canoa PSAD 56, a partir del 1 de abril de 1999.

CAPÍTULO 3

MARCO METODOLÓGICO

En este capítulo se explica el tipo de investigación realizada y las herramientas metodológicas empleadas para alcanzar el logro de cada uno de los objetivos planteados.

3.1 Tipo de investigación

La investigación realizada se define como un proyecto especial (UPEL, 2006), por cuanto se corresponde con el desarrollo de una metodología que aportará beneficios en la aplicación de mapas de distribución de contaminantes de petróleo con el objetivo de utilizarlos para aplicar técnicas de saneamiento como la biorremediación y para diferentes aplicaciones medioambientales. Se realizó una investigación documental, para determinar todos los procedimientos requeridos para cumplir con las exigencias técnicas y o normativas y se utilizó un caso de estudio para validar las diferentes etapas. Los datos, no han sido recopilados de forma directa y provienen de investigaciones previas.

3.2 Fases de la investigación

La investigación se dividió en 5 fases, cada una en correspondencia con cada uno de los objetivos específicos planteados. Estas fases se mencionan a continuación:

3.2.1 Identificación de las fuentes de contaminantes de suelos impactados por hidrocarburos y su impacto en el ambiente.

En esta etapa se realizó una investigación documental para identificar las características y condiciones del sitio objeto del estudio. Para ellos se recopiló información

sobre la ubicación geográfica y los límites del área analizada, así como posibles áreas de influencia. Características: climáticas, demográficas, especificación de uso de la tierra, topografía del terreno, geología, hidrología y toda la información histórica posible sobre las actividades antrópicas posibles fuentes de contaminación.

Se identifican las posibles fuentes de contaminación por hidrocarburos de petróleo y las potenciales amenazas.

La identificación y descripción del tipo de suelo sobre el cual se desea realizar el análisis, es fundamental para desarrollar una estrategia de saneamiento. De acuerdo con las características del suelo los derrames de petróleo pueden tener diferentes efectos como se explica en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Comportamiento de los derrames de petróleo en el suelo

Comportamientos de derrames de petróleo en el suelo	
Suelos arenosos	Se desplaza con mayor velocidad, en una mayor cantidad y puede alcanzar mayores profundidades
Suelo arcilloso	No permea con facilidad y puede alcanzar pocas profundidades
Suelo con alto contenido de materia orgánica	Se adhiere a las partículas de restos vegetales y permanece más tiempo en el ambiente

Nota: Adaptado de Spark 2003

Para determinar los posibles contaminantes en el suelo se debe cumplir con las siguientes etapas:

3.2.1.1 Definición del modelo conceptual del sitio contaminado (MCS)

Toda la información recopilada durante la investigación histórica y las caracterizaciones del sitio debe ser integrada y presentada como un modelo conceptual del área (MCS), el cual es un paso previo y necesario para la posterior elaboración del análisis

de riesgo ambiental y permite dimensionar adecuadamente el alcance de la investigación.

Un MCS, es una representación escrita o gráfica de un sistema ambiental y los procesos físicos, químicos y biológicos, que determinan el transporte de contaminantes desde su fuente a través del medio ambiente hasta su receptor. (MAVDT, 2007). Debe ser desarrollado cada vez que se requiere realizar la caracterización de un sitio contaminado y se debe desarrollar en las primeras etapas de la investigación y actualizar a medida que se avanza y se logran nuevos hallazgos. Lo recomendable, es que se inicie tan pronto como se realice la investigación histórica y la visita inicial del sitio (Keogh, 2012).

Aunque cada modelo depende del tamaño y complejidad del sitio, en general debe cumplir con las siguientes etapas:

- **Definición del sitio y recopilación de toda la información histórica:** una manera de establecer de forma unívoca las condiciones del sitio y sus características físicas, incluyendo la geología, topografía, hidrología, flora, fauna, clima, las curvas de nivel para el establecimiento de los patrones de drenaje y las escorrentías para el establecimiento de posibles rutas de contaminación de las aguas subterráneas. También se debe identificar las actividades que determinan el uso de la tierra y la infraestructura presente en el área.
- **Determinar las fuentes de contaminación y contaminantes potencialmente peligrosos:** con base en toda la información recopilada se deben identificar todas las actividades potencialmente contaminantes, además de la frecuencia y la duración de esas actividades, el período de uso de cualquier químico contaminante y la movilidad y persistencia del mismo dentro del área.
- **Identificar los posibles receptores sensibles de los efectos de la contaminación:** esto aplica a todos los posibles receptores actuales y futuros de los

efectos de la contaminación. Estos receptores pueden ser humanos: residentes, visitantes, trabajadores entre otros; y receptores ambientales: flora, fauna, microorganismos, cuerpos de aguas superficiales y aguas subterráneas.

- **Identificar las rutas de migración y los medios de exposición:** estas son las posibles vías en las cuales los contaminantes pueden liberarse en el ambiente. Esto incluye, pero no se limita a: lixiviado de contaminantes a través del suelo hasta las aguas subterráneas, migraciones de contaminante entre acuíferos, transporte de contaminantes a través de las aguas subterráneas, volatilización del contaminante desde el suelo y aguas hasta el aire, y transporte de contaminantes por movimientos de tierra.
- **Elaborar diagrama:** con toda la información recopilada, se elabora un esquema de diagrama de flujo del proceso, que permite interpretar el comportamiento de la contaminación en el suelo.

El MCS, es una herramienta muy poderosa por cuanto proporciona las bases para la evaluación de daños a la salud humana y los riesgos ambientales y puede ser de mucha ayuda en el desarrollo o evaluación de estrategias de remediación.

Los efectos a la salud de la exposición cualquier sustancia peligrosa, depende de la dosis, la duración, el tipo de exposición, la presencia de otras sustancias químicas, así como las características y los hábitos del individuo. (www.atsdr.cdc.gov). Para el caso de los TPH, estos se liberan al ambiente cuando ocurren derrames de petróleo y todos sus derivados. Al ocurrir un derrame directamente en el suelo, estos pueden movilizarse por lixiviado hasta las aguas subterráneas y contaminar los acuíferos. Allí los componentes individuales pueden separarse de la mezcla original dependiendo de las propiedades químicas de cada componente. Algunos compuestos pueden adherirse a partículas en el suelo y permanecer allí durante mucho tiempo. También es posible, que algunos microorganismos pueden influir en la degradación de algunos de esos compuestos. (www.atsdr.cdc.gov).

En la normativa legal venezolana en los artículos 49, 50 y 53 del decreto 2635: Normas para el control de la recuperación de materiales peligrosos y el manejo de los desechos peligrosos (publicado en gaceta oficial extraordinaria No. 5245 de fecha 3 de agosto de 1998,) se establecen algunos límites permisibles de variables medidas en el suelo tanto para confinamiento y esparcimiento de mezclas suelo-desecho. Ver tabla 3.2.

Tabla 3.2 Límites permisibles en la mezcla suelo-desecho

Límites permisibles en la mezcla suelo-desecho	Para confinamiento en suelo	Para esparcimiento en suelo
pH	6 -9	5 -8
Conductividad eléctrica [mmhos/cm]	<12	<3,5
Relación de adsorción de sodio (RAS)	<12	<8
Cloruros totales [ppm]		<2500
Aceites y grasas [porcentaje en peso]	<3%	≤1
Aluminio intercambiable [meq/100gr]		<1,5
Saturación con bases[%]		>80
Arsénico	40 mg/kg	25 mg/kg
Bario	40.000 mg/kg	20.000 mg/kg
Cadmio	10 mg/kg	8 mg/kg
Mercurio	10 mg/kg	1 mg/kg
Selenio	10 mg/kg	2 mg/kg
Plata	10 mg/kg	5 mg/kg
Cromo	500 mg/kg	300 mg/kg
Zinc	500 mg/kg	300 mg/kg
Plomo	500 mg/kg	150 mg/kg

Fuente: Decreto 2635: Normas para el control y recuperación de materiales peligrosos.

Tabla 3.3 Condiciones para el biotratamiento

Condiciones para la práctica de biotratamiento	
pH	Entre 6-8
Contenido de hidrocarburos biodegradables en el desecho	Entre 1% y 10%
El desecho no exceda las concentraciones máximas permisibles en lixiviados establecidas en el anexo D del decreto 2635.	
Para la aplicación de la técnica de biotratamiento sobre el suelo arable	El área de disposición final debe estar conformada por suelos de textura franca, o franca arenosa o franco limoso o franco arcilloso, o acondicionado artificialmente. La profundidad del nivel freático debe ser mayor de 4 m. El área de disposición final no debe ser inundable

Fuente: Decreto 2635: Normas para el control y recuperación de materiales peligrosos.

De acuerdo con la tabla 3.3, en el decreto 2635, también se establece los requerimientos mínimos para la aplicación de técnicas de biotratamiento en suelos que están destinados a actividades de agricultura. Entre esas condicionales se tienen: la textura del suelo, la profundidad del nivel freático y el nivel de riesgo de inundación.

3.2.2 Definición del mecanismo para la recolección de datos.

La ubicación espacial del área a evaluar es indispensable para poder elaborar la actividad de georreferenciación. La selección del sistema de coordenadas a utilizar, la información cartográfica y el uso de un sistema de posicionamiento global (GPS), para determinar el acceso al lugar, así como las coordenadas geográficas de los puntos y el perímetro del área para la evaluación son indispensables desde el inicio de las actividades en campo. Cuando el área es muy pequeña como en el caso de diseños experimentales en una parcela, es suficiente con hacer asignaciones según planos cartesianos (Giraldo, n.d.). Al utilizar un sistema de información geográfica, la primera actividad

que se debe realizar es la selección del sistema de coordenadas y el dispositivo receptor del sistema de geoposicionamiento adecuado.

Para la recolección de datos en el área seleccionada, se debe realizar un plan de muestreo, donde se especifique toda la información tanto del área como del tipo de muestras a recolectar. De acuerdo con lo especificado por Marlon G. Cline (1944), en sus principios para el análisis de suelos: el límite de exactitud de un muestreo de suelos está determinado por la muestra y no por los análisis posteriores. En su opinión el error originado por el muestreo y tratamiento de la muestra es de tres a seis veces mayor al generado por el sub-muestreo y el análisis.

3.2.2.1 Elaboración de un plan de muestreo

El establecimiento de una metodología de muestreo de suelos está dada principalmente por el conocimiento de su variabilidad espacial (Navas, 2003). La variabilidad espacial de los datos geográficos está expresada en la denominada Primera Ley de la geografía del geógrafo Waldo Tobler (1970): “Todas las cosas están relacionadas entre sí, pero las cosas más cercanas en el espacio, están más relacionadas que las más lejanas”. Esta ley es el fundamento de la dependencia espacial, la autocorrelación espacial y es utilizada por los métodos de interpolación espacial. De allí la importancia de seguir una adecuada metodología de muestreo. Las etapas que se deben cumplir para elaborar un plan de muestreo de suelos, son: definición de los objetivos del muestreo; preparación de la información preliminar; definir la estrategia de muestreo; elaborar el plan de trabajo en campo y elaborar el informe del resultado del procedimiento. (ISO STD 10381-1:2000), MINAMB Perú, 2014), (NMX-AA-132-SCFI-20016).

3.2.2.1.1 Definición de los objetivos del muestreo

Definen el eje central de un plan de muestreo. Depende de varios factores que se deben considerar y están orientados por:

- Los objetivos generales de la investigación.
- Las condiciones del área: edáficas, meteorológicas, geológicas hidrológicas.
- Los parámetros a ser determinados.
- El tipo de contaminación
- Cantidad y calidad de muestras requeridas
- Estimación de costos.

De acuerdo a lo establecido en la norma ISO 10380-1:2002 existen cuatro objetivos generales con los cuales se puede direccionar un muestreo de suelos:

- Para la determinación de la calidad del suelo.
- Para la caracterización en la preparación de mapas de suelos.
- Para dar soporte a acciones legales o regulatorias.
- Como parte de un análisis de riesgo.

El objetivo del muestreo determinara la orientación del plan. En la figura 3.1, se muestra un esquema de los posibles objetivos del muestreo.

3.2.2.1.2 Preparación de la información preliminar

Es la recopilación de la información disponible mediante la investigación documental y visitas preliminares al sitio. Comprende la indagación de antecedente históricos, investigaciones previas, revisiones sobre limitaciones geográficas o legales para acceso al lugar, condiciones climáticas y todo aquello que pueda aportar datos sobre el lugar de la investigación.

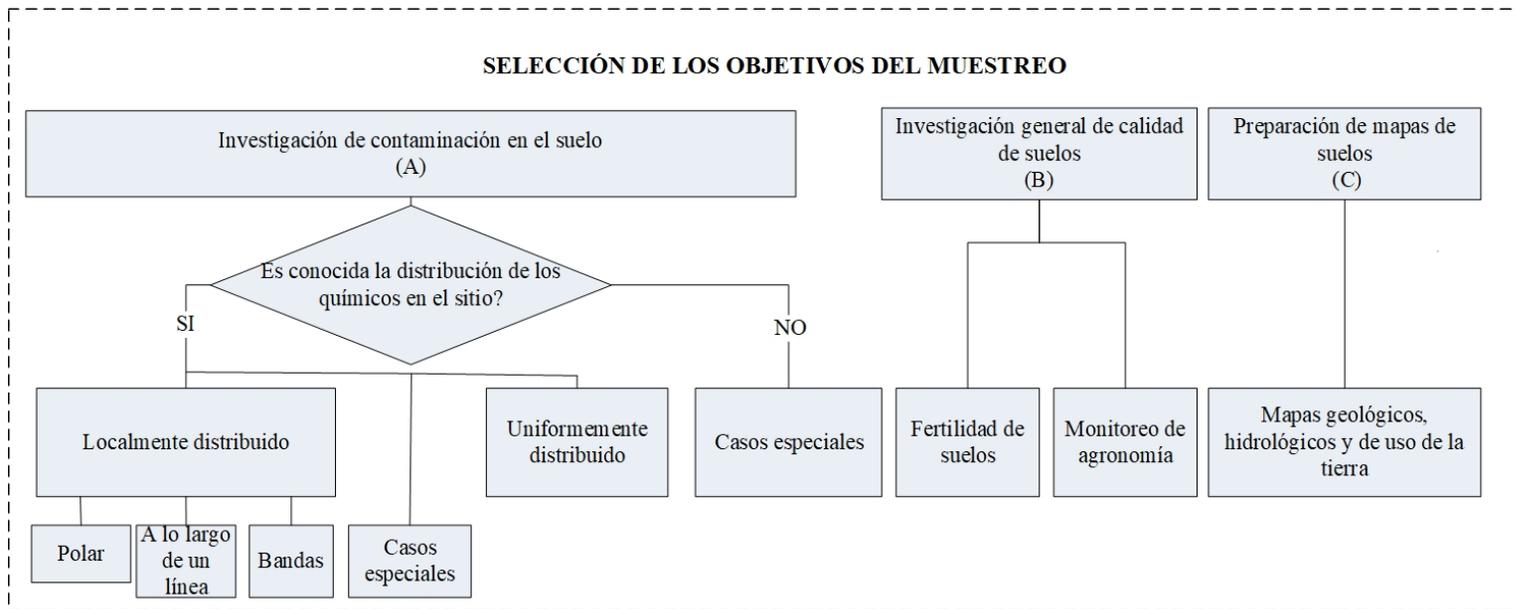


Figura 3.1 Diagrama de flujo del procedimiento de selección de los objetivos del muestreo.
Fuente: Adaptado de ISO 10381-1

3.2.2.1.3 Definir la estrategia de muestreo.

La estrategia de muestreo determina las acciones concretas a ejecutar referente a: el esquema del muestreo, tipo de muestreo, el número de muestras, las profundidades del muestreo, el tipo de muestras a recopilar y los métodos a utilizar.

a) Esquemas de muestreo

De acuerdo con el patrón de los datos a ser analizados, se debe dar el tratamiento respectivo. De allí que la manera de seleccionar el esquema de ubicación del muestreo es muy importante para lograr el mejor nivel del promedio de la superficie. La muestra debe lograr una representación adecuada de la población, de manera que se reproduzcan los datos esenciales que son importantes para la investigación. (Descargado de http://www.estadistica.mat.uson.mx/material/el_muestreo.pdf). Para determinar el esquema de muestreo a utilizar es importante tener en cuenta la información recopilada sobre las áreas más probables donde se pueda esperar presencia de contaminación. Eso ayudara a definir la intensidad a utilizar sobre todo en aquellas áreas más susceptible a encontrar contaminación por haber estado expuestas a actividades industriales potencialmente contaminantes. Cuando se realiza análisis espacial, la estrategia de muestreo es un factor muy importante a considerar. La eficiencia de una estrategia de muestreo depende de la distancia entre los puntos de muestreo (Martínez, 1998).

Existen diferentes esquemas de muestreo espacial en función de la ubicación de los puntos en el espacio. Considerando n puntos de muestreo en ubicaciones $\{x_1, \dots, x_n\}$. En la tabla 3.4, se muestran los patrones utilizados para cada uno de los tipos de muestreo especificados.

Tabla 3.4 Tipos de muestreo de acuerdo con la ubicación de los puntos en el espacio

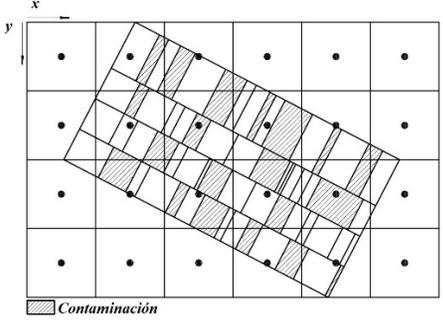
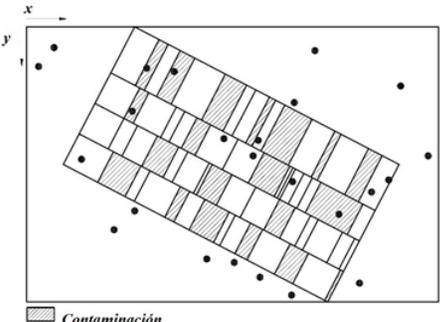
Tipo de muestreo	Patrón del muestreo
<p>Dirigido: realizado a juicio de los expertos. Se realiza en una ubicación específica porque ya se tiene información previa del sitio, se conoce el producto derramado y es evidente la extensión de la contaminación.</p>	
<p>Estadístico: realizado de acuerdo a modelos matemáticos. Se usa para comprobar de manera homogénea las presencia, ausencia o distribución de contaminantes. Se realiza en toda el área pudiendo hacerse de manera aleatoria, estratificada y sistemática.</p>	
<p>Sistemático centrado: se toman las muestras en el centro cada uno de los estratos cuadrados que son los más usados comúnmente, aunque no es obligatorio que sea de esta forma.</p>	 <p>Contaminación</p>
<p>Aleatorio simple: se selecciona cada punto independientemente dentro de la región en estudio.</p>	 <p>Contaminación</p>

Tabla 3.4 Continuación. *Tipos de muestreo de acuerdo con la ubicación de los puntos en el espacio*

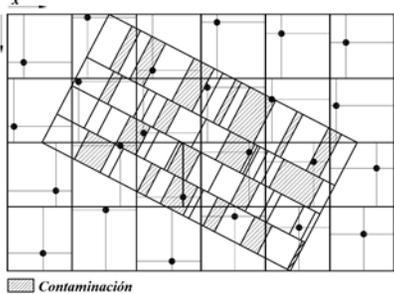
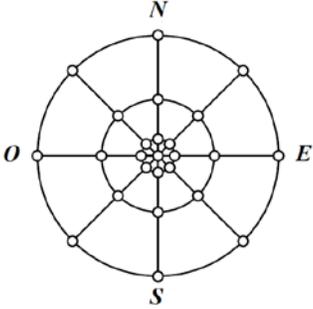
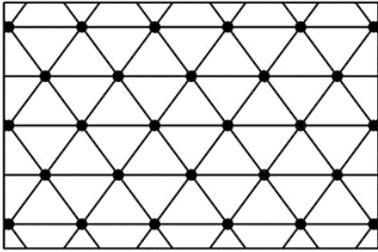
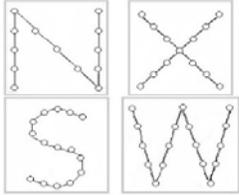
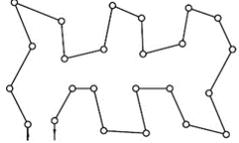
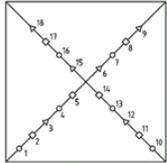
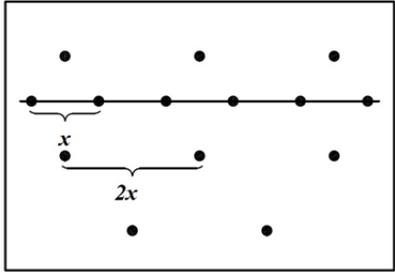
Tipo de muestreo	Patrón del muestreo
<p>Sistemático no alineado: para este caso se mantienen los estratos cuadrados o de otra forma sistemáticamente ubicados y las muestras se toman aleatoriamente dentro de estos.</p>	
<p>Rejillas circulares: se realiza en secciones de círculos concéntricos cuyos radios dependen del área en el cual se sospecha exista contaminación. Es útil para determinar niveles de contaminación en áreas de tanques de almacenamiento o cuando se tienen descargas de plantas industriales (ISO, 2002). Desventajas: la ubicación radial de los puntos (forma de estrella, la alta densidad de puntos en el centro de la rejilla y el presumir la distribución equitativa del contaminante en todas las direcciones lo que no es común en el campo.</p>	
<p>Rejillas triangulares: es un caso de un muestreo sistemático con una rejilla no regular. La rejilla son triángulos equiláteros y los puntos de muestreo se colocan en cada uno de los vértices de los triángulos.</p>	

Tabla 3.4 Continuación. *Tipos de muestreo de acuerdo con la ubicación de los puntos en el espacio*

Tipo de muestreo	Patrón del muestreo
<p>En patrones irregulares: es una modificación del muestreo aleatorio estratificado en el cual el patrón tiene forma de “N”, “S”, “W”, y “X” (a). Usado ampliamente en agricultura. Se utiliza con la premisa de que la estructura del suelo es relativamente homogénea. Se toman muestras a lo largo de la línea de cada patrón y pueden ser mezclados para los análisis. No pueden ser usado para estimar niveles de contaminación. Otra manera de muestrear el área en patrones irregulares es utilizando un muestreo en zig-zag en forma transversal al área (b), o utilizar las diagonales móviles (c).</p>	<p>(a)</p>  <p>(b)</p>  <p>(c)</p> 
<p>Muestreo sobre una línea: se utiliza cuando el patrón de contaminación sigue una forma lineal. Tal es el caso de las fugas en oleoductos. Los puntos de muestreo, pueden estar ubicados debajo de la línea de tubería y cuando no es posible por motivos prácticos en la zona cercana. Se dibuja una línea principal con puntos de muestreo separado una distancia x a una distancia lo más cercana a la tubería y líneas paralelas con puntos separados una distancia $2x$, tal como se muestra en la figura. Las separaciones de las líneas auxiliares están en función del nivel de detalle que se desea lograr. (MINAMB Perú, 2014), (ISO 13801-1:2002).</p>	

Nota: adaptado de ISO 10381-2002; Ripley (2008).

La selección del esquema de muestreo dependerá del criterio del investigador en función de variables como área, ubicación, facilidad de acceso, recursos económicos disponibles entre otros. Sin embargo, se debe considerar siempre la correlación espacial de los datos. En la figura 3.2, se muestra el diagrama de flujo de selección del patrón de muestreo recomendado de acuerdo con los objetivos de la investigación.

“El muestreo aleatorio estratificado y el sistemático, son más eficientes que el muestreo aleatorio simple... La eficiencia relativa del muestreo aleatorio estratificado y la del muestreo sistemático respecto del muestreo aleatorio simple varían con el tamaño del estrato y con la distancia mínima entre elementos de una misma muestra sistemática, disminuyendo al aumentar dicho tamaño y dicha distancia.” (Ripley, 2004).

b) Tipos de muestreo

En la tabla 3.5, se presenta una breve descripción de los tipos de muestreo de acuerdo con sus objetivos.

Tabla 3.5 Tipos de muestreo de acuerdo con los objetivos

Tipo de muestreo	Objetivos
Muestreo de identificación	Determinar la existencia de contaminación a través de la obtención de muestras representativas con el fin de establecer si el suelo cumple con los estándares de calidad ambiental.
Muestreo de detalle	Obtener muestras representativas para determinar el área y volumen distribuido horizontal y verticalmente del suelo contaminado y detalla, delimita y cuantifica las zonas de afectación.
Muestreo de nivel de fondo	Determinar la concentración de químicos regulados por los estándares de calidad ambiental del suelo en sitios contiguos al área contaminada.
Muestreo de comprobación de remediación	Demostrar que las actividades realizadas durante el proceso de remediación ejecutadas en el suelo contaminado, lograron devolverlo a los valores de calidad especificado.

Nota: Adaptación MINAMB, Perú, 2014.

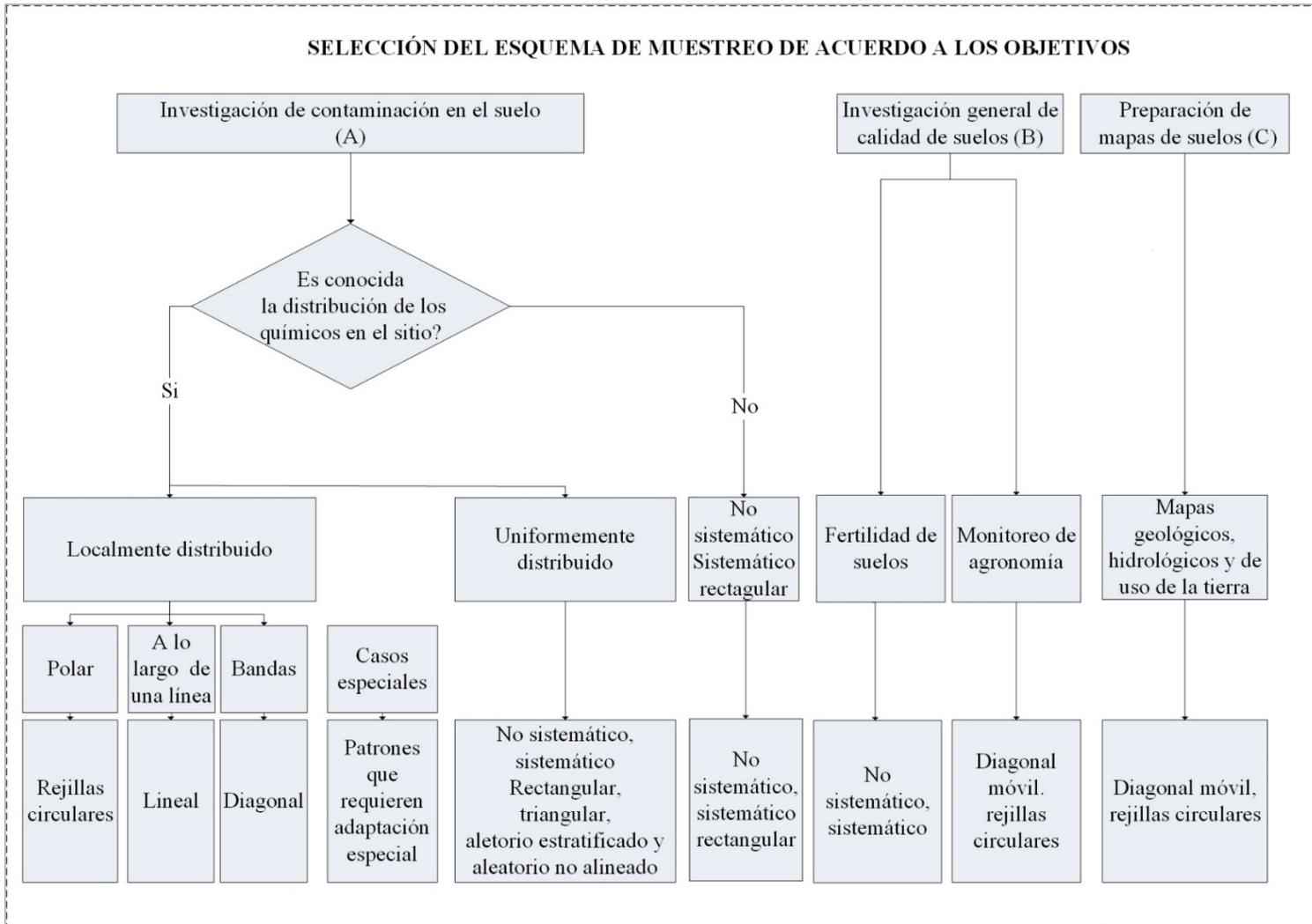


Figura 3.2 Diagrama de flujo de procedimiento de selección del esquema de muestreo de acuerdo con los objetivos.

Nota: Adaptado de ISO 10381-1:2002

c) Definición del número de muestras

Un punto de muestreo es la ubicación espacial georreferenciada del lugar donde se recolectarán las muestras, sean estas superficiales o en profundidad. (Min. ambiente Perú, 2014).

El número mínimo de puntos de muestreo se determina en función al área de interés para el tipo de muestreo a realizar. En la tabla 3.6, se especifica el número de puntos de muestreo recomendados por área en el caso del muestreo de identificación.

Tabla 3.6 Número mínimo de puntos para el muestreo de identificación

Área de interés en hectáreas	Puntos de muestreo
0,1	4
0,5	6
1	9
2	15
3	19
4	21
5	23
10	30
15	33
25	36
30	38
35	40
40	42
50	44
100	50

Fuente: Guía para muestreo de suelos (Min. Ambiente del Perú, 2014).

Para áreas superiores a 100 hectáreas el número de puntos del muestreo de identificación, se determina por la siguiente fórmula:

$$N = 0.1X + 40 \quad \text{Ecuación 3.1}$$

Dónde:

N = número mínimo de puntos de muestreo.

X = superficie en hectáreas

Para el muestreo de detalle, el número de puntos de muestreo está determinado por el resultado del número de puntos del muestreo de identificación que se encuentra fuera de los parámetros de calidad del suelo. En la tabla 3.7, se muestra el número de puntos recomendados para el muestreo de detalles.

Tabla 3.7 Número mínimo de puntos para el muestreo de detalles

Puntos de muestreo de identificación	Puntos de muestreo en el muestreo de detalle
1	4
2	6
3	7
4	9
5	11
6	13
7	14
8	16
9	18
10	20
15	28
20	37
25	46
50	90

Fuente: Guía para muestreo de suelos (Min. Ambiente del Perú, 2014).

Para un número de puntos mínimos que no esté en la tabla se utiliza la fórmula:

$$N = 1.75X + 2 \quad \text{Ecuación 3.2}$$

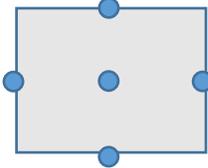
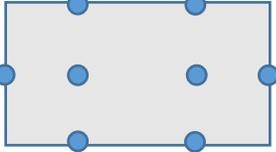
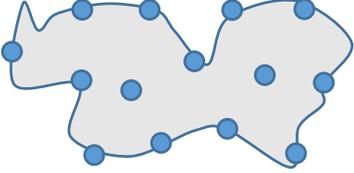
Dónde:

N = número mínimo de puntos de muestreo.

X= superficie en hectáreas.

Para el muestreo de comprobación de remediación el número de muestras está determinada por la forma y el área de excavación. En la tabla 3.8, se presenta un resumen de esta especificación.

Tabla 3.8 Número mínimo de puntos para el muestreo de comprobación

Área	Puntos de muestreo	Esquema
Forma regular menores a 1000 m ²	Cuadrada = 5 muestras Una muestra en cada pared y una en el fondo	
	Rectángulo = 8 muestras Una muestra en cada pared corta, 2 en cada pared larga y dos en el fondo	
Forma irregular entre 1000 y 5000 m ²	Una muestra por cada 15 a 20 m lineales en las paredes del perímetro del área excavada y 2 en el fondo para áreas menores a 1000 m ² y 3 a 4 para áreas hasta 5000 m ²	
Forma irregular entre 1000 y 9999 m ²	Una muestra por cada 75 a 100 m lineales en cada pared corta o larga (distancia/75 -100 = 100NPM). Dos muestras en el fondo por cada 1000m ²	
Forma regular de 10.000 a 150.000 m ²	Una muestra a por cada 75 a 100 m lineales en cada pared corta o larga (distancia/75-100 = NPM). El número de puntos de muestreo (NPM) en el fondo se calculará según la ecuación. $NPM = 18 + 2,34 * A$ NPM= número de puntos de muestreo. A= Superficie en hectáreas	

Fuente: Adaptado de MINAMB. Perú 2014.

d) Profundidad de muestreo.

En cuanto a la profundidad del muestreo, la norma ISO 13381-1, no hace ninguna clasificación o recomendación y lo deja al criterio del investigador en función de los objetivos del muestreo. Sin embargo, se pueden identificar dos tipos de muestreo según su profundidad: los muestreos superficiales (hasta 1 m de profundidad) y los muestreos de profundidad (mayores de 1 m). (MINAMB Perú, 2014), (NMX-AA-132-SCFI-2006).

Los muestreos superficiales se pueden realizar con herramientas manuales, porque requieren poca cantidad de material, excepto en los casos en que se requieran hoyos o zanjas que generaran grandes volúmenes de material. Estos últimos requieren de particiones para dividir la muestra sistemáticamente hasta obtener una muestra representativa.

Para la evaluación de riesgos a la salud humana se sugiere el uso de muestras superficiales compuestas tomadas de un muestreo bidimensional. Esto significa la toma de 10 a 25 unidades en un área y una capa determinada y unir las para formar una muestra compuesta. (MINAMB Perú, 2014)

El espesor de las capas se define de acuerdo con el uso del suelo según lo especificado en la tabla 3.9.

Tabla 3.9 Profundidad del muestreo según el uso del suelo

Usos del suelo	Profundidad del muestro (capas)
Agrícola	0 - 30 cm (Profundidad de aradura) 30 - 60 cm
Residencial/parques	0 - 10 (Capa de contacto oral o dérmica con contaminantes) 10 - 30 (Profundidad máxima alcanzable por los niños)
Comercial/Industrial	0 - 10 (Capa de contacto oral o dérmica con contaminantes)

Fuente: MINAMB Perú, 2014.

e) Tipos de muestras

Las muestras de suelos pueden ser simples o compuestas. Las muestras simples son tomadas de una sola extracción y se usan comúnmente en trabajos de investigación y en suelos muy homogéneos. Las muestras simples también se denominan muestras grandes. (Rihm y Anacona 2004).

Las muestras compuestas están formadas por varias muestras simples o submuestras, también denominadas incremento que se mezclan en un recipiente. Todas las submuestras deben provenir de una misma sección transversal del suelo. Estas muestras se utilizan cuando el lugar de análisis no es homogéneo.

f) Técnicas de muestreo

Las técnicas de muestreo a aplicar dependen de: el objetivo del estudio, las condiciones geográficas, topográficas y edafológicas del sitio y de las especificaciones y calidad de los análisis a ser ejecutados. En la tabla 3.10, se presenta una descripción de los equipos más comúnmente utilizados de acuerdo con el tipo de muestras a recolectar. Para la extracción de muestras en la fase gaseosa del suelo (aire, vapores, contaminantes volátiles), la técnica de muestreo requiere de la construcción de pozos de extracción y equipamiento especial.

Tabla 3.10 Sistemas para la toma de muestras de suelo

Sistema	Tipo de muestras	Tipo de suelo y profundidad
Sondeos manuales	Muestras superficiales	Todo tipo de suelos con profundidad hasta 1 m.
Zanjas y hoyos	Muestras superficiales y profundas	Todo tipo de suelos en profundidades hasta de 4 m
Sondeos liner	Muestras profundas	Suelos arenosos profundidad hasta 20 m
Sondeos semimetálicos	Muestras profundas	Suelos rocoso o arenosos profundidad hasta 10 m
Sondeos mecánicos	Muestras profundas	Todo tipo de suelos. Grandes profundidades

Nota: Adaptado de Minamb Perú, (2014).

3.2.2.1.4 Trabajo de campo

Las actividades a desarrollar en el campo, requieren el control y la planificación necesaria que debe llevar todo proyecto. Se debe elaborar un cronograma y los procedimientos requeridos para cada una de las actividades en campo, especificando en detalle las actividades, los responsables, los instructivos de trabajo, los materiales, y los procedimientos de seguridad. En relación con los materiales se debe garantizar todo lo necesario para la adecuada manipulación, preservación y traslado de las muestras, garantizando el debido etiquetado y registro. Tanto el personal que participa en las actividades, debe estar capacitado para garantizar la calidad del procedimiento de muestreo y evitar la contaminación de las muestras.

3.2.2.1.5 Informe final del procedimiento de muestreo

El reporte final de actividades, debe incluir todos los detalles tanto cronológicos, como procedimentales para garantizar la confiabilidad en los resultados del procedimiento.

3.2.2.2 Metodología para la evaluación de riesgos.

De acuerdo con la metodología propuesta por el MAVDT (2007), USEPA 1998, y Rihmy Anacona 2004, la metodología debe seguir las etapas descritas en el diagrama del proceso presentado en la figura 2.3, en el capítulo 2, sección 2.2.6.

3.2.2.2.1 Identificación del problema

Involucra la recolección de toda la información del sitio, para identificar los posibles daños a la salud y al medio ambiente. Se debe realizar la revisión histórica del lugar, la identificación de los suelos, los contaminantes presentes y sus valores en el medio, las características que afectan la distribución y transporte de contaminantes y las características de la población y la biota afectada. Se debe realizar una visita preliminar al terreno.

Una etapa primordial de este proceso es la elaboración del modelo conceptual del sitio (MCS). De acuerdo con Rihm y Anacona, el modelo conceptual del sitio es una descripción escrita y una representación visual de las relaciones conocidas, esperadas y/o previstas entre los receptores (humanos y biota) y las fuentes de contaminación a las que estos pueden estar expuestas. En este se debe:

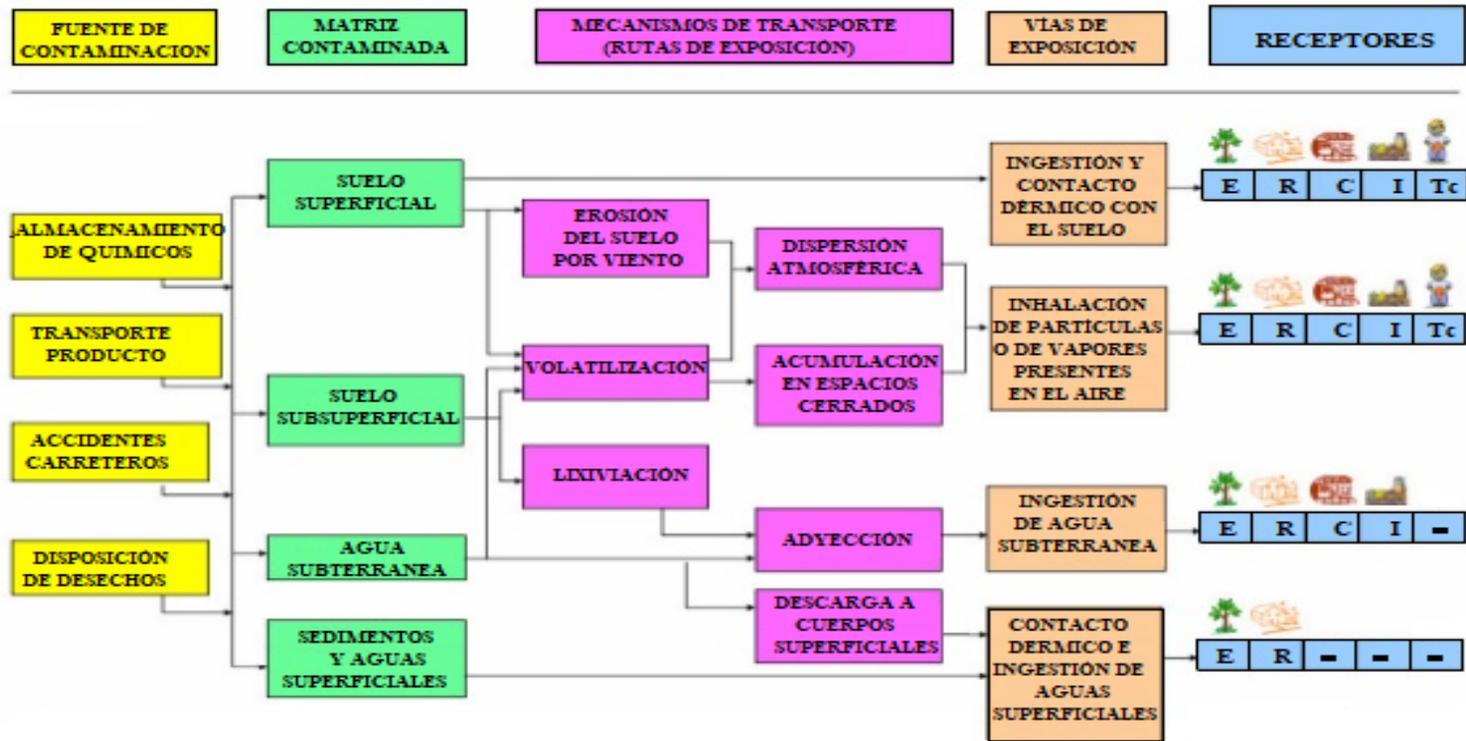
- Identificar las fuentes de contaminación.
- Identificar las rutas de exposición: estas pueden ser por ingestión, por inhalación o por contacto directo.
- Determinar los receptores de los impactos de esos contaminantes.

Toda la información debe ser representada de manera gráfica. En la figura 3.3, se muestre un ejemplo de una alternativa para la representación de modelo conceptual, de un análisis de riesgo en un ambiente laboral. En este ejemplo, se ha realizado la representación gráfica del modelo identificando: las fuentes de contaminación, las áreas contaminadas, los mecanismos de transporte, las vías de exposición y cada uno de los receptores afectados.

3.2.2.2.2 Evaluación de la toxicidad.

La toxicidad es la relación existente entre la magnitud de los efectos a un organismo que produce una sustancia, en función de la cantidad del producto tóxico ingerido. La magnitud y tipo de los efectos adversos depende de la duración de la exposición. Para determinar los efectos sobre el organismo se realizan estudios experimentales con animales, basándose en las curvas dosis respuesta, debido a que la dosis determina el tipo y magnitud de la respuesta biológica (Rihm y Anacona 2004). De estos estudios se derivan los índices de toxicidad.

MODELO CONCEPTUAL



Receptores: (E) Ecológico (biota en general), (R) Residencial, (C) Comercial, (I) Industrial, (Tc) Trabajador de la construcción

Figura 3.3 Ejemplo de un modelo conceptual

Nota: descargado de <https://es.slideshare.net/Luzangelmo/evaluacion-riesgo-en-ambientes-laborales>

Los índices de toxicidad son los valores con los cuales se deben comparar las dosis suministradas. La toxicidad se determina evaluando los efectos de los CDI de acuerdo a la siguiente clasificación:

CDIs cancerígenos: químicos a los cuales se les ha comprobado de manera científica que podrían causar cáncer.

CDIs no cancerígenos: químicos que pueden ocasionar enfermedades diferentes al cáncer.

El riesgo de los compuestos cancerígenos se expresa como la probabilidad de que una persona contraiga cáncer en su vida por efecto de la exposición, multiplicada por el potencial cancerígeno del compuesto. (Rihm y Anacona 2010).

$$\mathbf{Riesgo = Dosis \times FP} \quad \mathbf{Ecuación 3.3}$$

Donde:

Riesgo = Probabilidad de que un individuo desarrolle cáncer [adim.]

Dosis = Dosis diaria del contaminante recibida por el receptor (promediada durante 70 años [mg/kg-día]

FP = factor de pendiente [1/(mg/kg-día)]

El factor de pendiente es un valor derivado de la curva dosis-respuesta y corresponde a la pendiente de la región linearizada, de la curva obtenida como resultado del ajuste de una curva práctica de la aplicación de dosis a animales de laboratorio, para extrapolar los efectos a los seres humanos.

La USEPA y la Unión Europea (UE), definen como 1 en 100.000 (1×10^5) el valor de “riesgo aceptable”, para la mayoría de los cálculos de toxicidad de compuestos individuales.

El riesgo de los compuestos no cancerígenos, se expresa como un coeficiente de peligro (HQ) por sus siglas en inglés (Hazard quotient), el cual se calcula dividiendo la

dosis de exposición calculada de un compuesto cancerígeno por una dosis de referencia segura (USEPA).

$$HQ = \frac{Dosis}{RfD} \quad \text{Ecuación 3.4}$$

Donde:

HQ = cociente de peligro

Dosis = dosis suministrada [mg/kg · d]

RfD = dosis de referencia

$$HQ > 1 \Rightarrow \text{Peligro potencial de efecto no cancerígenos}$$
$$HQ \leq 1 \text{ Riesgos aceptables}$$

La RfD es el índice de toxicidad más usado en la evaluación de riesgos por exposición a sustancias no cancerígenas. Representa las concentraciones en las cuales se observan efectos negativos en los seres humanos o en la biota. La dosis de referencia se calcula en base al valor de nivel de efecto adverso no observable (NOAEL).

Según la USEPA, el NOAEL es el nivel de exposición al cual no hay incrementos desde el punto de vista estadístico y biológico, en la frecuencia o severidad de los efectos adversos entre la población expuesta y la población de control. El NOAEL, se calcula, haciendo múltiples estudios en poblaciones sometidas a diferentes dosis y ajustando la curva dosis –respuesta. Los valores umbral deben ser cuidadosamente definidos y por ello son definidos por un panel de expertos. Cuando no se puede establecer un NOAEL, entonces se utiliza el **LOAEL** (nivel mínimo con efecto adverso observable) más bajo.

Se puede calcular valores de dosis de referencia para una sustancia, dependiendo de la vía de entrada del contaminante, el período de exposición y el tipo de efecto observado. Para calcular la dosis de referencia se divide el NOAEL producto de los factores de incertidumbre el factor modificador:

$$RfD = \frac{NOAEL}{FI_1 \times FI_2 \times FI_3 \times FI_4 \times FM} \quad \text{Ecuación 3.5}$$

Donde:

RfD = Dosis de referencia del contaminante [mg/k/día].

NOAEL = Nivel de efecto adverso no observable [mg/kg/d]

Fi = Factores de incertidumbre

FM = Factor modificador

Los factores (Fi), representan la incertidumbre producto de la extrapolación de los datos de las bases de datos de los experimentos con animales, para su aplicación a los seres humanos o para aplicar ajustes por variabilidad cuando se debe considerar subpoblaciones sensibles como ancianos y niños. El factor modificador (FM), se utiliza para realizar ajustes de incertidumbre adicionales para considerar situaciones no evaluadas con los Fi previos.

Determinar las dosis de referencia requiere, por lo tanto, contar con el resultado de múltiples estudios experimentales en poblaciones controladas y rigurosamente analizadas por los expertos para determinar los NOAEL, por lo cual no siempre están disponibles para algunos casos en particular. La USEPA, emite boletines donde publica los resultados de las dosis de referencia aprobadas a medida que se soportan con los estudios respectivos. En el Anexo H-1, se presenta un resumen de algunas dosis de referencia disponibles en la literatura técnica.

3.2.2.2.3 Evaluación de la exposición.

La dosis de exposición se calcula para todas las sustancias en el punto de contacto de todas las rutas de exposición más significativas. Se expresa en términos de la cantidad de la sustancia en contacto con el cuerpo por unidad de masa corporal por unidad de tiempo. (Rihm y Anacona, 2004). La fórmula general es:

$$I = \frac{C \times CR \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad \text{Ecuación 3.6}$$

Donde:

I = Ingestión del contaminante

C = Concentración del contaminante en el punto de exposición [mg, /L, m³ ó kg]

CR = Tasa de contacto [L, m³ ó kg/día]

EF = Frecuencia de exposición [días/año]

ED = Duración de exposición [años]

BW = Peso corporal [kg]

At = tiempo de promediación [días]

Para cada vía de exposición se tiene una ecuación particular.

Para el caso de la evaluación de contaminantes en el suelo, a continuación, se presenta las fórmulas para el cálculo de las dosis de exposición por ingestión accidental de suelos contaminados, la dosis por inhalación de materiales particulados y compuestos volátiles y el contacto dérmico con los suelos.

a) Ingestión accidental:

$$Dosis = \frac{C_{suelo} \times EF \times FI \times ED \times IR_{adulto,niño} \times CF^1}{BW_{adulto,niño} \times AT \times CF_2} \quad \text{Ecuación 3.7}$$

Donde:

C_{suelo} = Concentración en el suelo [mg/kg]

EF = Frecuencia de exposición [días/año]

FI = Fracción de ingestión proveniente de la fuente contaminada [adimensional]

ED = Duración de exposición [años]

$IR_{adulto,niño}$ = tasa de ingestión de suelo [mg/día]

CF_1 = factor de conversión [kg/mg]

$BW_{adulto,niño}$ = Peso corporal [kg]

CF_2 = tiempo de promediación [días]

Observaciones: en el anexo H-2, se encuentran los parámetros para la exposición a través de la ingestión de tierra (suelos).

b) Inhalación

Fórmula para el cálculo de la dosis de inhalación de material particulado y compuestos volátiles según los escenarios de uso previsto.

$$Dosis = \frac{C_{suelo} \times EF \times ED \times \left(\frac{1}{VF} + \frac{0.036 \times (1-V) \times \left(\frac{Um}{Ut}\right)^3 \times F(x)}{(Q/C) \times CF_3} \right) \times IR_{aire}}{BW \times AT \times CF_2} \quad \text{Ecuación 3.8}$$

Donde:

C_{suelo} = Concentración en el suelo [mg/kg]

EF = Frecuencia de exposición [días/año]

ED = Duración de exposición [años]

VF = Factor de volatilización [m^3/kg]

Um = Velocidad del viento promedio anual [m/s]

Ut = Valor umbral equivalente a la velocidad de viento a 7m sobre el nivel del suelo [m/s]

$F(x)$ = función de velocidad del viento [adimensional]

BW = Peso corporal [kg]

CF_3 = factor de conversión [s/hora]

IR_{aire} = tasa de inhalación [$m^3/día$]

CF_2 = factor de conversión [días/año]

LT = período vital [años]

AT = tiempo de promediación

Observaciones: en la tabla H-3 del anexo H, se muestran los parámetros para el cálculo de la exposición a través de la inhalación, de compuestos volátiles o particulados.

c) Contacto dérmico

$$Dosis_{cont.dermico} = \frac{C_{suelo} \times CF_4 \times SA \times AF \times ABS \times EF \times ED}{BW \times AT \times CF_2} \quad \text{Ecuación 3.9}$$

Donde:

C_{suelo} = Concentración en el suelo [mg/kg]

CF_4 = factor de conversión [(kg·cm²/mg·m²)]

SA = superficie expuesta de piel [m²/día]

AF = factor de adherencia de la tierra a la piel [mg/cm²]

ABS = factor de absorción dérmica [adimensional]

EF = Frecuencia de exposición [días/año]

ED = Duración de exposición [años]

BW = Peso corporal [kg]

AT = tiempo de promediación [años]

CF_2 = factor de conversión [días/año]

Observaciones: en la tabla H-4 (Anexo H), se encuentran los parámetros para el cálculo de la exposición a través de la ingestión de suelos contaminados.

3.2.2.2.4 Caracterización del riesgo.

En esta etapa se determina los riesgos potenciales que implican los contaminantes para los receptores identificados en el área de estudio. Se identifican los riesgos a la salud humana calculando por separado los riesgos por CDI cancerígenos y CDI no cancerígenos de acuerdo a lo especificado en las ecuaciones 3.3 y 3.4.

Riesgo CDI cancerígenos $\leq 10^5 \Rightarrow$ "Riesgo Aceptable".

Riesgo CDI no cancerígeno : $HQ \leq 1 \Rightarrow$ "Riesgo aceptable"

Para el riesgo ecológico se calcula con el método del cociente de peligro HQ. En este caso la fórmula es la siguiente:

$$HQ = \frac{\text{Exposición estimada}}{RfD} \quad \text{Ecuación 3.10}$$

Donde:

HQ = Cociente de peligro

RfD = Dosis de referencia

Exposición estimada = la concentración ambiental máxima calculada (equivalente a la concentración ambiental prevista o PEC (predicted environmental concentration)).

Para el caso de estudio se caracterizó el riesgo a los receptores humanos.

3.2.3 Evaluación de las técnicas para realizar el análisis espacial del área en estudio.

El objetivo es desarrollar mapas continuos de áreas contaminadas, con la información proveniente de los datos discretos generados en el muestreo. Para ello se debe realizar el análisis espacial de los datos.

La herramienta más efectiva para la descripción espacial es la visualización (Isaak y Srivastava, 2002). Para ello bastará con mostrar los datos espaciales en un mapa en el cual cada ubicación de los datos está representada en el espacio con su respectivo valor.

En geología, ambiente y otras ciencias se utiliza la interpolación espacial para determinar los valores de las variables en puntos no muestreados, para poder generar in-

formación continua de los puntos muestreados. Existen muchos interpoladores espaciales que pueden ser utilizados para aplicaciones ambientales y todos ellos tienen aproximadamente la misma fórmula general (Li y Heap, 2008) y (Webster y Oliver, 2001).

$$\hat{Z}(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i * z(x_i) \quad \text{Ecuación 3.11}$$

Dónde:

\hat{Z} = valor estimado del atributo en el punto de interés.

z = el valor observado en el punto de muestreo x_i .

λ_i = el peso asignado al punto de muestreo.

n = número de puntos muestreados usados para la estimación.

El procedimiento para la determinación de los valores λ_i , diferencia los métodos de interpolación espacial en: métodos no geoestadísticos, métodos geoestadísticos y métodos combinados. En la tabla 3.11, se presenta un resumen de los principales métodos.

Los métodos no geoestadísticos, son aquellos que estiman el valor de una variable en un punto con el aporte de la ponderación de los valores cercanos. Para ello, aplican la fórmula general establecida en la ecuación 3.11. Para utilizarlos se aplica la fórmula matemática y no hay ningún tipo de evaluación o aporte de la correlación espacial de los datos.

En la tabla 3.12 se presenta un resumen de los principales métodos de interpolación espacial no geoestadísticos y sus características.

Los métodos geoestadísticos, consideran que los datos están atados en el espacio geográfico de manera que presentan una estructura de correlación (Montero y Larraez, 2004). Esta estructura de correlación debe ser determinada para lograr la correcta aplicación del método.

“Para estimar la dependencia estadística de los valores (autocorrelación espacial), se cuantifica la estructura (variografía) creándose variogramas y funciones de covarianza para que se ajusten a los datos de un modelo de dependencia espacial.”

“Para la predicción de un valor desconocido en una localización específica, el kriging se basa en el modelo ajustado a partir de la variografía, la configuración de los datos espaciales y los valores de los puntos de las muestras medidos alrededor de la situación de predicción.”

Peña (2013).

Tabla 3.11 Métodos de interpolación espacial

Métodos Geoestadísticos	Método No Geoestadísticos	Método combinados
Kriging simple (Simple kriging SK).	El vecino más cercano (Nearest neighbours NN).	Clasificación combinada con otros métodos de interpolación.
Kriging ordinario (Ordinary kriging OK).	Triangulación (Triangulation TIN).	Superficies de tendencias combinadas con kriging.
Kriging en bloques (Block kriging BK).	Vecinos naturales (Natural neighbours NAN).	Gradiente combinada con kriging.
Kriging Universal (Universal kriging UK).	Inverso de la Distancia al cuadrado (Inverse Distance weighting IDW).	Modelo lineal mezclado.
Kriging simple con variación medias locales (SK with varying local means SKlm).	Modelos de Regresión (Regression model LM).	Árbol de regresión combinado con kriging.
Kriging con una derivación externa (Kriging with external drift KED)	Análisis de tendencia superficial (Trend surface análisis TSA)	Residual de máxima probabilidad empírica con el mejor lineal
Cokriging simple (Simple kokriging SCK).	Estratos y superficies de tendencia local (Splines & Local trend surfaces LTS).	Predictor no sesgado.
Cokriging ordinario (Ordinary cokriging OCK).	Clasificación (Classification CL).	Regression kriging.
Cokriging ordinario estandarizado (Standardized ordinary cokriging SOCK).	Árbol de regresión (Regression tree CART).	Gradiente más distancia inversa al cuadrado.
Kriging de componente principal (Principal component kriging PCK).	Superficies de estrías delgadas (Thin plate splines TPS).	
Cokriging colocado simple (Simple colocated cokriging SCCK).	Series de Fourier.	
Cokriging colocado ordinario (Ordinary colocated cokriging OCCK).	Gradiente.	
Kriging simple en estratos (Simple cokriging within strata SKWS).		
Kriging ordinario en estratos (Ordinary kriging within strata OKWS).		
Cokriging simple en estratos (Simple kriging within strata SCKWS).		
Cokriging ordinario en estratos (Ordinary cokriging within strata OCKWS).		

Nota: Adaptado de A review of spatial interpolation methods (Li & Heap, 2008).

Tabla 3.12 Métodos no geoestadístico

Método	Consideración	U/M	D/Es	L/G1	E/I	A/G	Limitaciones del procedimiento	Carga procesa- miento	Estructura datos salida	Adecuado para
El vecino mas cercano (Nearest neighbours NN)	Mejor predictor en punto muy cercanos	U	D	L	E	A	Ninguna valuación de error. El patrón del mosaico depende de la distribución de datos.	Pequeña	Polígonos o cuadrículas.	Datos nominales de los puntos de observación.
Triangulación (Triangulation TIN)	Mejor predicción son los puntos de datos dentro del triángulo.	U	D	L	E	A	Ninguna valuación de error. El patrón TIN depende de la distribución de datos y hay pocas maneras de formar triangulación y ninguna es mejor que otra.	Pequeña	Triángulos o cuadrículas	Interpolación rápida de datos dispersos en muestras regular o irregularmente espaciadas.
Vecinos naturales (Natural neighbours NAN)	Mejor predicción son los puntos de datos rodeados por el polígono	U	D	L	E	G	No valuación de error	Pequeña	Cuadrículas	Interpolación rápida para datos dispersos en muestras regular o irregularmente distribuidas.
Inverso de la Distancia al cuadrado (Inverse Distance weighting IDW)	Superficie sub-yacente es suave	U	D	L	I	G	No hay cálculo de error. El resultado depende del tamaño de la ventana de búsqueda y de las alternativas de parámetros de ponderación. Se pueden presentar pocas alternativas cuando es usado con densidades de datos altos, tales como contornos digitalizados.	Pequeña	cuadrículas, contornos	Interpolación rápida con datos dispersos en cuadrículas regulares o muestra irregularmente espaciadas.
Modelos de Regresión (Regression model LM)	Muestras independientes en varianza normal y homogénea.	U/M	E	GL	I	G	El resultado depende del modelo de regresión y la calidad y detalle de los datos de la superficie de entrada. El cálculo de error es posible si los errores de entrada son conocidos.	Pequeña	Polígonos o cuadrículas continuas	Modelado numérico simple de datos costosos cuando mejores modelos no están disponibles o se ha excedido el presupuesto.

Tabla 3.12 (Continuación). Métodos no geoestadísticos

Método	Consideración	U/M	D/Es	L/GI	E/I	A/G	Limitaciones del procedimiento	Carga procesa- miento	Estructura datos salida	Adecuado para
Análisis de tendencia superficial (Trend surface analysis TSA)	Explicación fenomenológica de la tendencia, datos normalmente distribuidos.	M	Es	GI	I	G	El significado físico de la tendencia puede no ser muy claro. Los valores atípicos y de borde pueden distorsionar la superficie. El cálculo del error, limitado a la bondad del ajuste.	Pequeña	Cuadrículas continuas	Cálculos rápidos y remoción de tendencias espaciales.
Splines y superficies de tendencia local (Splines & Local trend surfaces LTS)	El mejor predictor local es el punto de dato más cercano y datos normalmente homogéneos dentro de los límites.	M	E	L	I	G	El resultado depende de la extensión del parámetro y el detalle de la superficie de entrada de datos.	Moderada	Superficie de cuadrículas continuas	Interpolación rápida para datos dispersos en cuadrículas regulares o muestras irregularmente espaciadas.
Clasificación (Classification CL)	Homogeneidad dentro de ciertos límites.	U	D	GI	I	A	El delineado de las áreas y las clases puede ser subjetivo. El cálculo de error está limitado dentro de la clase de desviación estándar.	Pequeña	Polígonos clasificados	Cálculos rápidos cuando los datos son escasos. Eliminación de diferencias sistemáticas antes de la interpolación continua de puntos de datos .
Árbol de regresión (Regression tree CART)	Explicación fenomenológica de la varianza.	M	Es	GI	I	G	Requiere de una gran cantidad de datos.	Pequeña	Cuadrículas	Puede usarse como una primera etapa en la parte exploratoria en modelación. (Díaz , 2012)

Tabla 3.12 (Continuación). Métodos no geoestadísticos

Método	Consideración	U/M	D/Es	L/Gl	E/I	A/G	Limitaciones del procedimiento	Carga procesamiento	Estructura datos salida	Adecuado para
Superficies de estrías delgadas (Thin plate splines TPS).	La superficie subyacente es suave en todas partes.	U/M	D	L	E	G	Bondad de ajuste posible, pero dentro de la asunción que la superficie fijada es perfectamente suave.	Pequeña	Cuadrículas, contornos	Interpolación rápida (univariada o multivariada) de datos de elevación digital y atributos relacionados a la creación de modelos digitales de elevación (DEM) para datos moderadamente detallados.
Serie de Fourier	Utiliza la combinación de ondas senoidales en 2 dimensiones	U	Es	L			Solo aplicable a variables estrictamente periódicas por lo cual se usa muy poco .	Pequeña	Cuadrículas, contornos	Solo aplicable a variables estrictamente periódicas por lo cual es de muy rara aplicación.
Gradiente	Se utiliza para estimar la temperatura del aire en relación con la altitud o elevación y asume que el gradiente es constante en la región en estudio.	U	D	L	E	G	Limitado a las predicciones de temperatura.	Pequeña	Cuadrículas, contornos	Limitado a las predicciones de temperatura.

Nota: U=univariable/M=multivariable; D=determinístico/Es=estocástico; L=global/Gl= global; E=exacto /I=inexacto; A= abrupto/G = gradual.
Adaptado de: A review of spatial interpolation methods (Li & Heap, 2008).

Para los métodos kriging, se presupone que la distancia o la dirección entre los puntos de una muestra reflejan una correlación espacial que puede utilizarse para explicar la variación en la superficie. Estos métodos son los más adecuados cuando se sabe que existe una influencia direccional (ESRI, Arc. Gis 10.14).

No existe un criterio único para la determinación del método de análisis a utilizar para realizar la estimación de los puntos no muestreados a partir de los datos de muestreo utilizando análisis geoestadístico. Cada método de interpolación, es más apropiado para una situación que otra, y puede variar mucho en su nivel de complejidad, los parámetros y consideraciones que se deben realizar para utilizarlos y el tipo de salida que produce. ESRI® ArcGis 10.4, propone los siguientes árboles de decisión para orientar la selección del método de interpolación. En la figura 3.4, se muestra un árbol de decisión considerando la necesidad de calcular los errores en la predicción y muestra cuál de ellos cuentan con esta bondad.

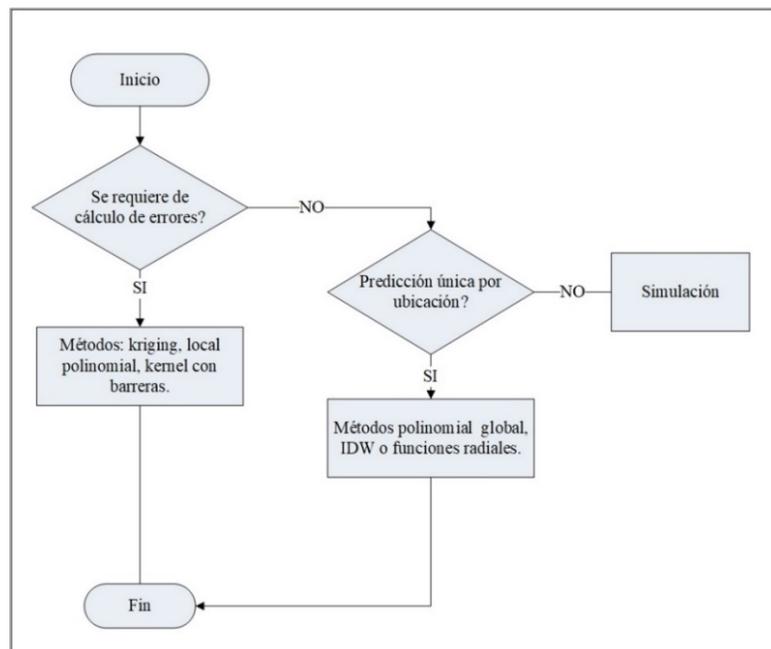


Figura 3.4 Selección del método de interpolación, basado en el tipo de salida que genera.

Fuente: ArcGis 10.4.1.

En la figura 3.5, se muestra el árbol de decisión que considera la necesidad de demostrar la correlación espacial de los datos .

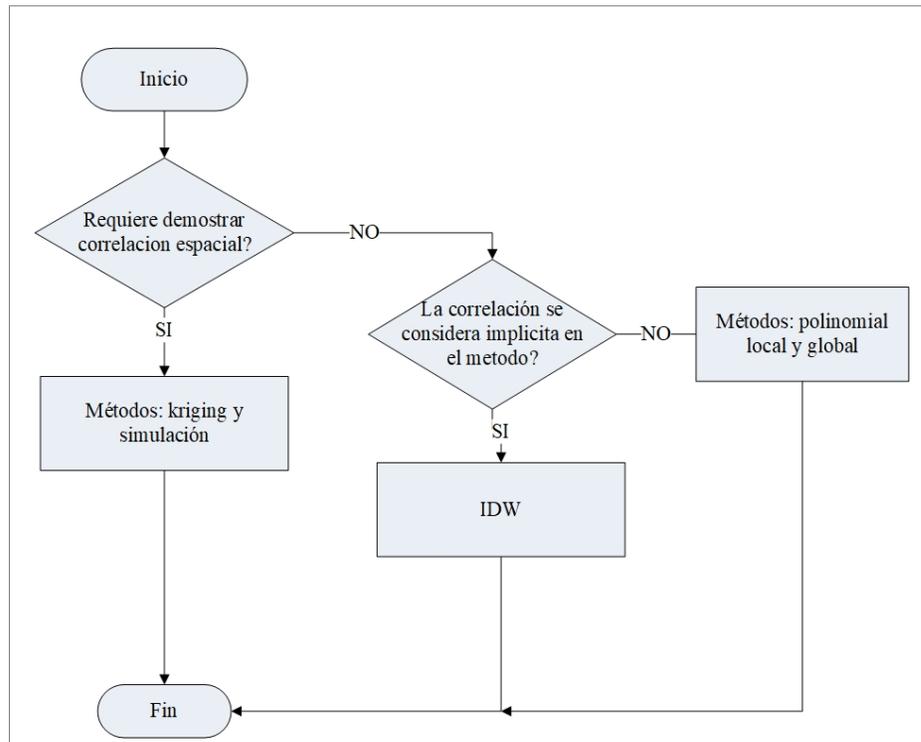


Figura 3.5 Árbol de decisión del método de interpolación, basado en la existencia de correlación espacial

Fuente: ArcGis 10.4.1.

De acuerdo a las investigaciones realizadas, el interpolador determinístico de ponderación de distancias inversas IDW (Inverse Distance Weighting) y el interpolador kriging ordinario, son los interpoladores más comúnmente utilizados. De la comparación realizada por Villatoro et al. 2008, ambos interpoladores tuvieron un desempeño similar, al utilizarlos en la predicción de la variación espacial de varias variables del suelo como el pH, el Ca, P y CICE, sin embargo, kriging fue ligeramente superior al predecir de una mejor manera la variación de pH, Ca, y CICE, mientras que el IDW, tuvo mejor desempeño con el P. Es de hacer notar que para el estudio de Villatoro se contaba con 66 muestras para hacer la comparación de los interpoladores.

Por su parte Kravchenko (2003), recomienda el IDW para bases de datos pequeñas, en donde los parámetros del variograma no son conocidos.

De acuerdo con la ecuación 3.11

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i * z(x_i)$$

La diferencia entre los métodos de interpolación es la manera en la cual definen sus valores λ . El método de interpolación IDW (no geoestadístico), calcula el peso de los valores de acuerdo a la relación inversa de la distancia (Villatoro et al. 2008), con la ecuación:

$$\lambda_i = \frac{[d(x_i, x_0)]^{-p}}{\sum_{i=1}^n [d(x_i, x_0)]^{-p}} \quad i = 1, \dots, n. \quad \text{Ecuación 3.12}$$

Donde “p” es un parámetro del exponente que controla que tan rápido los pesos de los puntos tienden a cero, conforme aumenta la distancia del sitio de interpolación. A mayor p, mayor peso es dado a los puntos más cercanos y con ello se obtienen superficies más suaves y las predicciones tienden al promedio de la muestra (Villatoro et al. 2008). Los valores usuales de p se encuentran entre 1 y 3, siendo el 2 el más común.

El método ordinario kriging, obtiene los pesos o valores resolviendo la ecuación:

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma[d(x_i, x_j)] + m = \gamma[d(x_0, x_i)], \quad i = 1, \dots, n; \quad \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad \text{Ecuación 3.13}$$

Dónde:

n es el número de observaciones

m es el multiplicador Lagrange para minimizar restricciones

h = la distancia

λ es el peso dado a cada una de las observaciones

La suma de todos los λ , es igual uno. Los subíndices i y j son los puntos muestreados, el subíndice 0 es el punto en estimación, x simboliza la variable medida y $d(x_i, x_o)$, es la distancia entre x_i y x_o a partir del semivariograma:

$$\gamma[d(x_i, x_o)] = \text{var}[z(x_i) - z(x_o)] \quad \text{Ecuación 3.14}$$

La semivarianza calculada, es una medida para determinar la similitud entre observaciones, a mayor similitud, menor semivarianza. (Villatoro, 2008)

Los métodos geoestadísticos son óptimos, cuando los datos están normalmente distribuidos y son estacionarios, lo cual significa que sus varianzas no varían significativamente en el espacio (Bohling, 2005), por este motivo se debe verificar la normalidad de los datos, de allí que el número de muestra utilizadas es significativo en la toma de decisión del interpolador a usar. ^

Antes de poder utilizar cualquiera de los métodos geoestadísticos, se debe realizar un análisis estructural de los datos (Giraldo, nd), (Li y Heap, 2008), para validar la estructura de dependencia espacial de los mismos y demostrar la auto correlación. De acuerdo con el manual de Arc Gis de Esri®, los pasos para utilizar un proceso kriging son los siguientes:

1. Realizar un análisis estadístico exploratorio de los datos.
2. Elaborar el modelo de variograma.
3. Realizar las predicciones.

El semivariograma experimental, proporciona la información sobre la auto correlación espacial de los datos analizados, pero no puede utilizarse directamente porque está sujeto a los errores del muestreo, de las aproximaciones, las tolerancias de los lags y al número limitado de datos. Por ello se debe utilizar un semivariograma teórico que se haya ajustado con el semivariograma experimental. El ajuste también permite obtener

una fórmula, que será usada en los cálculos. Las aplicaciones de software de sistemas de información geográfico trabajan con el semivariograma teórico y su ecuación.

Ajustar un semivariograma experimental al teórico se considera más un arte que una ciencia (Bohling, 2005). Para ello se realiza un análisis de la gráfica para identificar el rango, la meseta o el efecto pepita, para poder ejecutar el mejor ajuste a un modelo teórico. Para ajustar el mismo se utilizan diferentes modelos de funciones. Es un proceso similar al ajuste realizado con los datos de un modelo de regresión lineal. Existen diferentes modelos, ver figura 3.6, entre ellos se encuentran el esférico, el lineal, el exponencial y el gaussiano o la combinación de alguno de ellos.

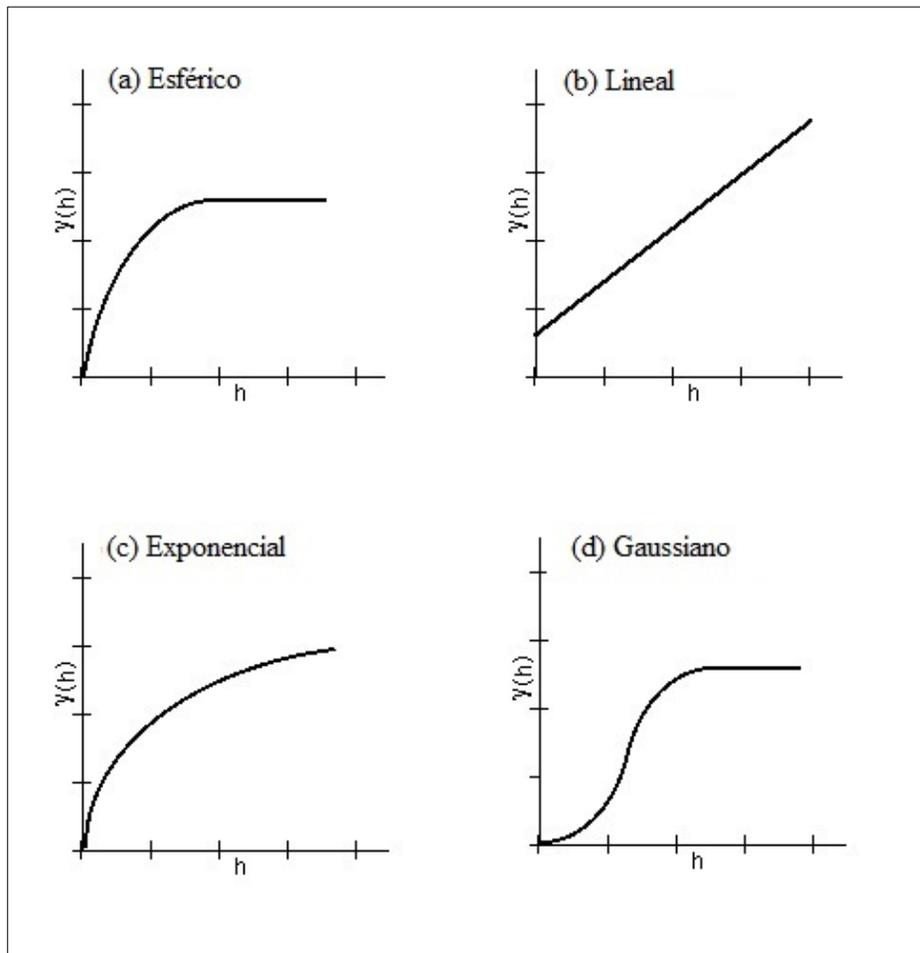


Figura 3.6 Modelos de variogramas

El modelo esférico (figura 3.8a), presenta un crecimiento rápido cerca del origen, pero los incrementos marginales van decreciendo para distancias grandes, hasta hacerse nulos para distancias superiores al rango (Giraldo, n.d.) La expresión matemática es:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] \quad \text{para } h \leq a \quad \text{Ecuación 3.15}$$

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \quad \text{para } h > a \quad \text{Ecuación 3.16}$$

$$\gamma(0) = 0 \quad \text{Ecuación 3.17}$$

Dónde:

C_1 representa la el umbral o meseta (*sill*)

$a =$ rango

$h =$ la distancia

En el modelo lineal (figura 3.8b), la curva es una recta y su expresión matemática es:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left(\frac{h}{a} \right) \quad \text{para } h \leq a \quad \text{Ecuación 3.18}$$

En el modelo exponencial (figura 3.8.c), la dependencia espacial tiene un crecimiento exponencial respecto a la distancia entre las observaciones. El valor del rango es igual a la distancia para la cual el semivariograma toma valor igual al 95% de la meseta (Giraldo, n.d.) la expresión matemática es:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[1 - \exp \left(\frac{-3h}{a} \right) \right] \quad \text{para } h \leq a \quad \text{Ecuación 3.19}$$

En el modelo gaussiano (figura 3.8.d), la dependencia espacial se desvanece en una distancia que tiende a infinito. Presenta forma parabólica cerca del origen.

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[1 - \exp\left(\frac{-h^2}{a^2}\right) \right] \text{ para } h \leq a \quad \text{Ecuación 3.20}$$

Para todos los modelos se cumplen las ecuaciones 3.16 y 3.17 para $h > a$ y $h = 0$ respectivamente.

Existe un modelo denominado “pepita puro” o modelo de independencia (ver figura 3.9) que indica la carencia de correlación espacial, entre las observaciones de una variable (Giraldo, nd). La fórmula matemática es:

$$\gamma(h) = 0 \quad \text{para } h = 0$$

$$\gamma(h) = C_0 \quad \text{para } h > 0$$

$$\text{Donde } C_0 > 0 \quad \text{Ecuación 3.21}$$

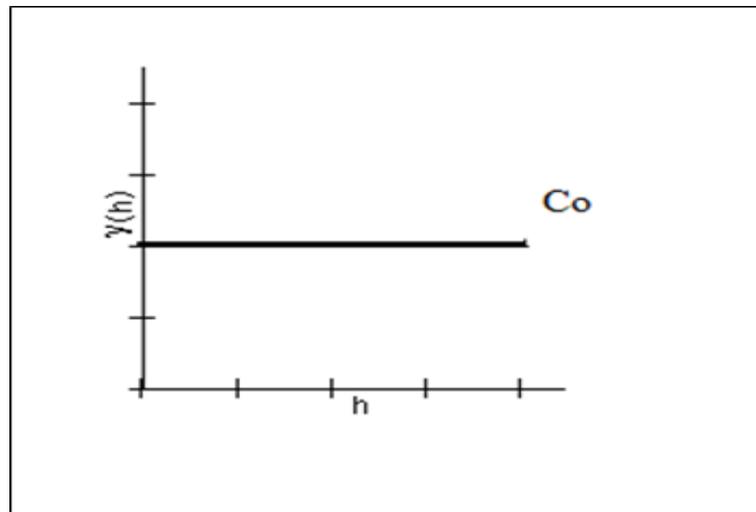


Figura 3.7 Modelo de independencia o "pepita puro"

Una vez verificada la auto correlación espacial y habiendo obtenido el semivariograma, se realizan las predicciones utilizando el método kriging que más se ajuste. Los

modelos kriging realizan sus predicciones, basados en ponderaciones de los valores en los puntos medidos. Al igual que en los métodos no geoestadísticos, los valores medidos más cerca de las ubicaciones a determinar tienen mayor influencia en la estimación, la diferencia está en el uso de las ponderaciones estimadas a partir del semivariograma desarrollado en el análisis exploratorio de los datos, con el cual se ha verificado la auto correlación espacial. En la tabla 3.13, se presenta un resumen de los interpoladores espaciales geoestadísticos, constituidos exclusivamente por los diferentes métodos kriging.

Tabla 3.13 Interpoladores espaciales geoestadísticos

Método	U/M	E/L	Tendencia Local	Información de coordenadas	Variable secundaria	Estimación por puntos/Bloques	Información secundaria exhaustiva	Estratificación	Ortogonalización de información secundaria	Muestras simples/múltiples en la ventana de búsqueda
Simple Kriging (Simple kriging SK)	U	E	no	no	no	Puntos	na	no	na	múltiple
Kriging ordinario (Ordinary kriging OK)	U	L	no	no	no	Puntos	na	no	na	múltiple
Kriging en bloques (Block kriging BK)	U	L	no	no	no	Bloques	na	no	na	múltiple
Kriging Universal (Universal kriging UK)	M	L	si	si	no	puntos	yes	no	no	múltiple
Kriging simple con variación medias locales (SK with varying local means SKlm)	M	L	no/si ¹	no	si	punto	si	no	no	múltiple
Kriging con una derivación externa (Kriging with external drift KED)	M	L	si	si	si	punto	si	no	no	múltiple
Cokriging simple (Simple kokriging SCK)	M	E	no	no	si	punto	no	no	no	múltiple
Cokriging ordinario (Ordinary cokriging)	M	L	no	no	si	punto	no	no	no	múltiple
Cokriging ordinario estandarizado (Standardised ordinary cokriging SOCK)	M	Ambos ²	no	no	si	punto	no	no	no	múltiple
Kriging de componente principal (Principal component kriging PCK)	M	L	no	no	si	punto	no	no	si	múltiple

Tabla 3-13 Continuación. Interpoladores espaciales geoestadísticos

Método	U/M	E/L	Tendencia Local	Información de coordenadas	Variable secundaria	Estimación por puntos/Bloques	Información secundaria exhaustiva	Estratificación	Ortogonalización de información secundaria	Muestras simples/múltiples en la ventana de búsqueda
Cokriging colocado simple (Simple colocated cokriging SCCK)	M	E	no	no	si	punto	no	no	si	múltiple
Cokriging colocado ordinario (Ordinary colocated cokriging OCCK)	M	L	no	no	si	punto	no	no	no	sencillo
Kriging simple en estratos (Simple cokriging within strata SKWS)	M	Edl	no	no	no	punto	na	si	na	múltiple
Kriging ordinario en estratos (Ordinary kriging within strata OKWS)	M	L	no	no	no	punto	na	si	na	múltiple
Cokriging simple en estratos (Simple kriging within strata SCKWS)	M	Edle	no	no	si	punto	no	si	no	múltiple
Cokriging ordinario en estratos (Ordinary cokriging within strata OCKWS)	M	L	no	no	si	punto	no	si	no	múltiple

Nota: U= univariable/M= multivariable; E=estacionario, Edle= estacionario dentro de los estratos, L= Local. Adaptado de: A review of spatial interpolation methods (Li y Heap, 2008).

3.2.4 Establecer la distribución de los contaminantes en el suelo utilizando sistemas de información geográfica.

Para realizar el análisis espacial de los datos y generar los mapas de distribución de contaminantes, se utilizó un sistema de información geográfico de la firma comercial ESRI®, el ArcGis versión 10.4 y sus herramientas de análisis. Se seleccionó esta herramienta, porque dispone de todos los algoritmos para realizar el análisis espacial de datos citados y por estar disponible una versión de trabajo en forma libre durante un período de evaluación.

Para la generación de mapas de distribución de contaminantes, se requiere como punto focal la distribución de los datos en el espacio geográfico real y su representación en la cartografía. La selección del sistema de coordenadas, es el paso prioritario al momento de iniciar el tratamiento de información en el sistema. El sistema de coordenadas, se establece durante el proceso de muestreo, al ubicar en el espacio real las coordenadas de los puntos sobre los cuales se están realizando las mediciones. De acuerdo a lo establecido por el Instituto geográfico de Venezuela Simón Bolívar, el sistema geodésico Nacional REGVEN debe ser adoptado por todos los trabajos que realice la administración pública, así como las instituciones privadas relacionadas. (Ver anexo C). Las coordenadas de los puntos pueden ser expresados en coordenadas geodésicas o en coordenadas UTM.

Para el caso de estudio, se dispuso de los resultados de los análisis de las muestras tomadas para determinar los valores de pH, conductividad eléctrica (CE), capacidad de intercambio catiónico (CIC), la humedad relativa, la retención de humedad, el carbono orgánico (COT), los hidrocarburos totales de petróleo (TPH) y la materia orgánica. En relación con los metales se poseen los resultados de los análisis para: manganeso (Mn), cadmio (Cd), cromo (Cr), cobre (Cu), cobalto (Co), zinc (Zn), níquel (Ni), hierro (Fe) y molibdeno (Mo). (Noguera y Armado, 2010). Para la caracterización físico-química del suelo, se realizó la medición de pH en agua y pH en KCl con un medidor de pH. La

conductividad eléctrica mediante conductímetro y la CO total por oxidación de la materia orgánica con dicromato de potasio en medio ácido. (Noguera y Armado, 2010).

Los análisis de metales en las muestras, se ejecutaron utilizando el procedimiento establecido en el manual práctico de métodos de análisis agrícolas utilizando una digestión con ácido nítrico: ácido clorhídrico: agua en una relación 2:1:1.

La metodología de análisis utilizada en el laboratorio para determinar cada uno de estos parámetros se muestra en la tabla 3.14.

Tabla 3.14 Métodos de análisis utilizados en el laboratorio para el estudio físico-químico de los suelos, materiales orgánicos y metales

Parámetro	Método	Técnica	Observaciones
pH	1: 1 agua 1: 1 KCl	Potenciométrica	
Conductividad eléctrica (CE) [μScm^{-1}]	1: 2,5 agua	Conductimetría	Medición en muestra suelo: agua en relación 1:2
Carbono orgánico (CO) [%]	Walkley-Black	Espectrofotometría 600nm	Oxidación de materia orgánica con dicromato de potasio en medio ácido.
Capacidad de intercambio catiónico (CIC)[meq/100gsuelo]	NH ₄ OAC 1N a pH7	Extracción y alcalimetría	Acetato de amonio normal y neutro.
Textura	Al tacto		
Humedad relativa (HR) [%]	10 g. de muestra T=105 °C en 1h.	Gravimetría	
Metales		Espectrofotómetro de absorción atómica. (GBC AVANTA 932 AA)	Método: tomado del manual práctico de métodos de análisis químico agrícola

Fuente: Armado y Noguera (2010).

Se cuenta con 10 muestras en total. Las muestras fueron tomadas en 5 pozos en la zona de influencia directa de los derrames y 5 muestras en puntos de control cercanas. A cada una de estas muestras se le determinaron los valores de las variables especificadas. Con estos resultados se realizaron análisis estadísticos. Por el número de datos disponibles (10 para cada caso), se considera una muestra pequeña. Para la determinación de la correlación entre las variables, se utilizó el coeficiente de correlación de rango de Spearman. Este método, permite identificar la correlación entre dos variables mediante un conjunto de datos de cada variable (Mendenhall, 2010). Se aplica para muestras menores de 30 datos y mayores de 5 y para ello se transforma los valores de las variables en rangos. El coeficiente de correlación de Spearman puede tomar valores entre -1 y +1.

-1 => correlación negativa
+1 => correlación positiva

La fórmula que se aplica es la siguiente:

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum d^2}{n(n^2-1)} \quad \text{Ecuación 3.22}$$

Donde:

r_s = coeficiente de correlación de Spearman

n = número de rangos

d = diferencia entre los rangos

El coeficiente de correlación de Spearman, se puede usar como estadístico de prueba para demostrar la hipótesis de que no existe asociación entre dos poblaciones (Mendenhall, 2010). La tabla con los valores críticos de r_s para pruebas de una cola se presentan en el anexo E.

Para la determinación de la autocorrelación espacial de las variables, se utilizó el método IDW, para la generación de las predicciones y la elaboración de los mapas de

distribución de contaminación. La selección fue basada en el número de muestras disponibles y la imposibilidad de construir un variograma experimental confiable para demostrar la existencia de una autocorrelación espacial. El método IDW, maneja de manera implícita la existencia de una auto correlación.

3.2.5 Diseño de la metodología para presentar la distribución de contaminación de suelos impactados con hidrocarburos, en forma espacial y georreferenciada.

Analizadas y validadas todas las etapas requeridas para el adecuado tratamiento de los datos y el análisis de los mismos, se recopiló toda la información técnica necesaria para estructurar la estrategia metodológica general que se debe seguir al momento de utilizar sistemas de información geográfica para elaborar los mapas de distribución de contaminantes.

Para definir la metodología se elaboraron los diagramas de flujo de cada proceso, relacionándolos con cada una de las etapas metodológicas a seguir.

CAPÍTULO 4

PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Esta sección del trabajo de investigación, presenta y explica los resultados de la misma, una vez se ha aplicado la metodología seleccionada y aporta información fundamental para lograr la validación de los objetivos planteados.

4.1 Ubicación del área de estudio.

En la figura 4.1, se presenta una imagen con la macro localización del área de estudio. Esta localización se realizó ubicando las coordenadas de los puntos del muestreo en una imagen satelital del area, tomada de la aplicación Google Earth, a la cual se realizó la georreferenciación utilizando el sistema de información geográfica Esri. Se obtuvieron las coordenadas UTM de los puntos muestreados a partir de la conversión de las coordenadas geográficas de los puntos.

Se trata de una zona agrícola y pecuaria, ubicada en el municipio Acosta del estado Falcón. Como puntos de referencia, se encuentra a unos 3,6 km al suroeste del caserío el Mene de San Lorenzo (19P 555692m E, 1220910m N) y a unos 8,55 kms al noreste del poblado de Yaracal (19P 549647m E, 1212898m N). Ver figura 4.2. donde se muestran las rutas de acceso.

La zona donde se encuentran los pozos pertenece a Petróleos de Venezuela y se encuentra bajo vigilancia de la comunidad. (Ver figura 4.3. Área de pozos en estudio). Esta zona tuvo su auge en la época de la exploración petrolera en Venezuela donde compañías extranjeras obtuvieron concesiones para explorar y excavar pozos en diferentes zonas del país. La disminución de la producción en la región nor-oriental del

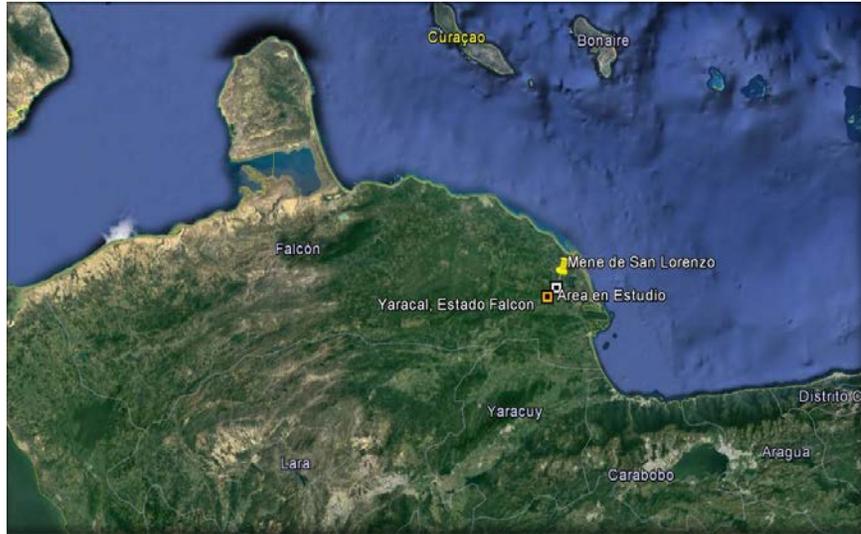


Figura 4.1 Macro localización del área de estudio
Fuente: Google Earth (imagen 2015).



Figura 4.2 Detalle de ruta de acceso al área
Fuente: Google Earth (imagen 2015)

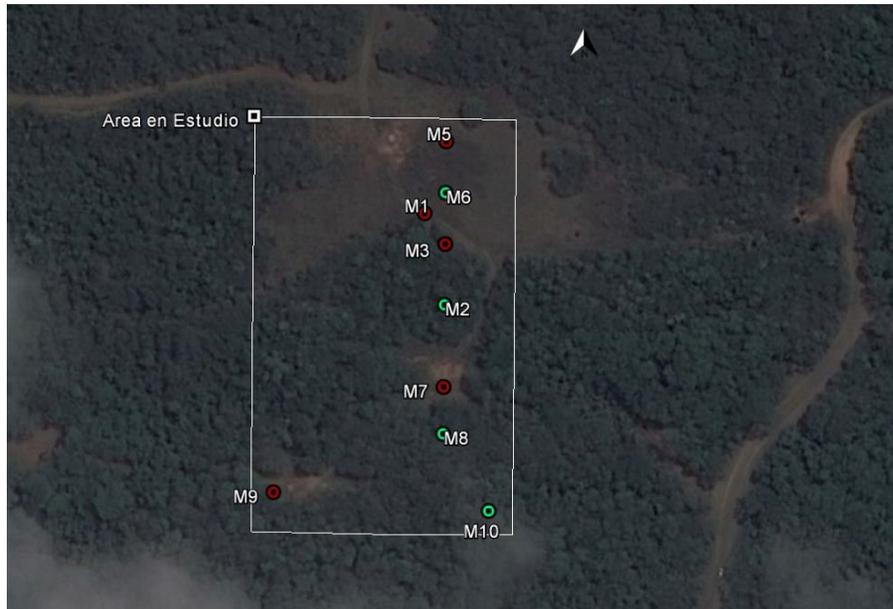


Figura 4.3 Detalle del área
Fuente: Google Earth (imagen 2015).

estado Falcón, motivaron su abandono por el año 1937. La mayoría de estos pozos fueron sellados al momento del cierre, pero aproximadamente 15 de ellos están emanando petróleo naturalmente al ambiente. (Fernández et al. 2008).

El estado Falcón se caracteriza por tener un clima semi árido, de acuerdo con información tomada de la página web de Instituto Nacional de estadísticas:

“Los vientos alisios actúan constantemente sobre la costa del estado, modificando las condiciones climáticas. La temperatura promedio en las llanuras costeras es de 28,7° C, mientras que en la zona montañosa el promedio es de 21,2° C. Las precipitaciones son escasas hacia la costa, aumentando hacia las zonas montañosas, con una media anual de 750 mm. De acuerdo al sistema de clasificación de Köeppen, en la entidad se dan diversos climas, como el de la estepa (Bs), sabana (Aw) y desierto (Bw)”. (<http://www.ine.gov.ve>).

En relación a los suelos:

“Hay la presencia de diferentes tipos: en la línea costera son calcáreos, y entre las serranías de Lara y Falcón son Franco-arcillosos. Varían en calidad, pero en general la disponibilidad de tierras para la agricultura tradicional puede clasificarse de escasa, con 89% de muy bajo potencial, 3% de bajo potencial y 6% de moderado potencial. Solamente un 2% de ella, ubicadas en valles del Sureste y áreas aluviales, cuencas con muy alto potencial. Las limitaciones de los suelos áridos y semiáridos provienen de la salinidad, el déficit hídrico provocado por la poca precipitación, la baja concentración de materia orgánica y la influencia de agentes climáticos como el viento.”

(<http://www.ine.gov.ve>).

4.2 Identificación de las fuentes de contaminantes. Modelo conceptual del área.

El área de encuentra contaminada con crudo liviano (30° API), el cual emana naturalmente de los pozos clausurados. En las figuras 4.4 y 4.5, se muestra la contaminación en el área. De acuerdo con los resultados de los análisis en las áreas impactadas con el crudo, se puede detectar contenido elevado porcentaje de hidrocarburos de petróleo (HTP) en las muestras analizadas.



Figura 4.4 Derrames de petróleo crudo en Yaracal, estado Falcón

Fuente: Armado y Noguera 2010.

Con la data recopilada de las investigaciones de Noguera y Armado (2010), Fernández et al. 2008, se elaboró la tabla de características físico-químicas del suelo contaminado con hidrocarburos en la zona en estudio. (Corrales y Guanipa, 2016).



Figura 4.5 Derrames de petróleo crudo en el área en estudio

Fuente: Corrales y Guanipa, 2016

Tabla 4.1 Caracterización físico-química general del suelo contaminado con hidrocarburos en Yaracal, estado Falcón

Parámetro	Valor
Textura	Franco arenoso
pH	4,3 -7,6
Temperatura [°C]	29
Fósforo [ppm]	17
Potasio [ppm]	8
Sodio [ppm]	45
Carbono orgánico	4,47
Nitrógeno total	0,11
Conductividad eléc-	0,4
TPH [%]	7,96

Fuente: Corrales y Guanipa (2016).

Con la información histórica del área, la investigación documental sobre la climatología, cartografía, la memoria fotográfica y el informe de las investigaciones de Noquera y Armado 2010, y Fernández et al. 2008, se elaboró el modelo conceptual de área impactada tal y como se muestra en la Figura 4.6.

En el modelo conceptual, se esboza que la fuente de contaminación se ejecuta por dos vías: el crudo que impacta en el suelo y el contenido de metales pesados. Los medios expuestos son: los suelos superficiales por la acción de las aguas que esparcen el derrame y el contacto directo con la huella del mismo; y el subsuelo por el lixiviado que penetra y permea a través de él, con la posibilidad de contaminar las aguas subterráneas. Las rutas y las vías de exposición son: el contacto directo con los suelos superficiales; la inhalación o contacto directo con el petróleo derramado, que ocurre por el transporte del mismo por las aguas y el escurrimiento en el suelo; y el contacto dérmico o consumo de las aguas subterráneas que puedan haber sido contaminadas por lixiviado. De acuerdo con los mapas del área y la investigación documental no existen fuentes de agua potable en las cercanías. Si se observaron pozos superficiales para abrevaderos de ganado.

Los receptores son los residentes de la comunidad, los visitantes que acudan ocasionalmente por razones de trabajo o turismo, los animales y plantas que hacen vida y se alimentan de los recursos de la zona y los microorganismos presente en el suelo impactado.

El modelo conceptual, permite establecer el alcance de los compuestos a evaluar en las muestras a recolectar. Para este caso se consideró en la evaluación además de las características físico-químicas, al análisis de metales pesados debido a que estos están contenidos normalmente en el petróleo crudo y representan una importante fuente de contaminación .

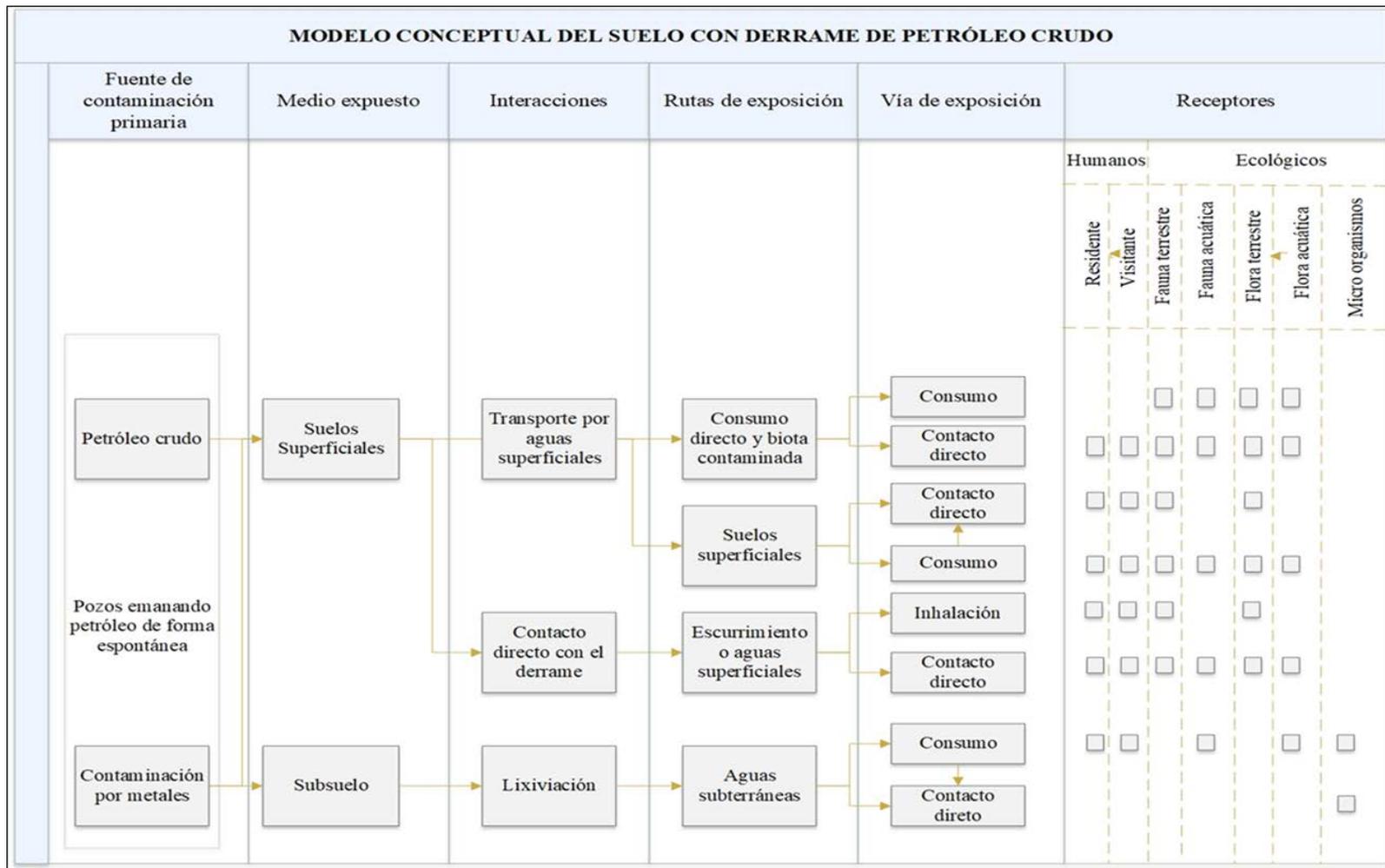


Figura 4.6 Modelo Conceptual del sitio

4.3 Resultados del muestreo.

Para el caso de estudio el mecanismo de muestreo utilizado por los investigadores fue un muestreo aleatorio estratificado, tomando muestras directamente sobre los pozos que presentan emanaciones de crudo y muestras de control sobre zonas cercanas, no impactadas para realizar las comparaciones. El muestreo fue realizado en temporada de sequía. (Armado y Noguera, 2010).

Los datos provienen de las cinco muestras tomadas de los suelos impactados con petróleo crudo se identificaron como M1, M3, M5, M7 y M9 y las cinco muestras de control se identificaron como: M2, M4, M6, M8 y M10.

La tabla 4.2, muestra las coordenadas de los puntos de muestreo utilizando las coordenadas geográficas, y el sistema de coordenadas de la Red Geocéntrica venezolana REGVEN y la proyección transversa de Mercator UTM . En las notas y

Tabla 4.2 Coordenadas de puntos muestreados en la zona en estudio

Id	Muestra	Elevación [m]	Coordenadas Geográficas		Coordenadas UTM		
			Latitud	Longitud	Huso	Este X	Norte Y
1	M1	33.883	11°0,910'	68°29,857'	19P	554880	1217702
2	M2	51.259	11°0,889'	68°29,852'	19P	554889	1217663
3	M3	55.775	11°0,903'	68°29,852'	19P	554889	1217689
4	M4	66.773	11°0,921'	68°29,852'	19P	554889	1217722
5	M5	49.631	11°0,927'	68°29,852'	19P	554889	1217733
6	M6	47.162	11°0,915'	68°29,852'	19P	554889	1217711
7	M7	50.227	11°0,870'	68°29,852'	19P	554889	1217628
8	M8	51.600	11°0,859'	68°29,852'	19P	554889	1217608
9	M9	51.550	11°0,845'	68°29,892'	19P	554816	1217582
10	M10	54.126	11°0,841'	68°29,841'	19P	554909	1217575

Fuente: Armado y Noguera (2010).

especificaciones de los experimentos realizados por Armado y Noguera (2010) y Fernández et al. (2008), no se menciona o especifica las características del dispositivo receptor GPS utilizado para determinar las coordenadas geográficas de los pozos y los puntos de muestreo.

Los puntos muestreados se encuentran dentro de un área aproximada de 20.000 metros cuadrados (En la figura 4.3 se mostró el polígono que delimita dichos puntos).

Para este caso, se cuenta con 10 muestras de la zona estudiada. De acuerdo con (Spiegel, 1969) para $N < 30$, esta se denomina una “pequeña muestra”. y en ellas no se puede asumir que la distribución muestral sea normal, como sucede cuando N aumenta.

En la figura 4.7, se presenta la ubicación de los puntos de muestreo. En la tabla 4.3, se presente la distancia entre dichos puntos. Los puntos más cercanos entre si se encuentran a 11 m. (M4, M5, y M6), mientras que los más alejados se encuentran a 167,72 m (M5 y M9).

Tabla 4.3 Distancias entre los puntos de muestreo [m]

	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10
M1	0	40	16	22	32	13	75	94	136	130
M2	40	0	26	59	70	48	35	55	109	90
M3	16	26	0	33	44	22	61	81	130	116
M4	22	59	33	0	11	11	94	114	158	148
M5	32	70	44	11	0	22	105	125	168	159
M6	13	48	22	11	22	0	83	103	148	137
M7	75	35	61	94	105	83	0	20	86	57
M8	94	55	81	114	125	103	20	0	77	39
M9	136	109	130	158	168	148	86	77	0	93
M10	130	90	116	148	159	137	57	39	93	0

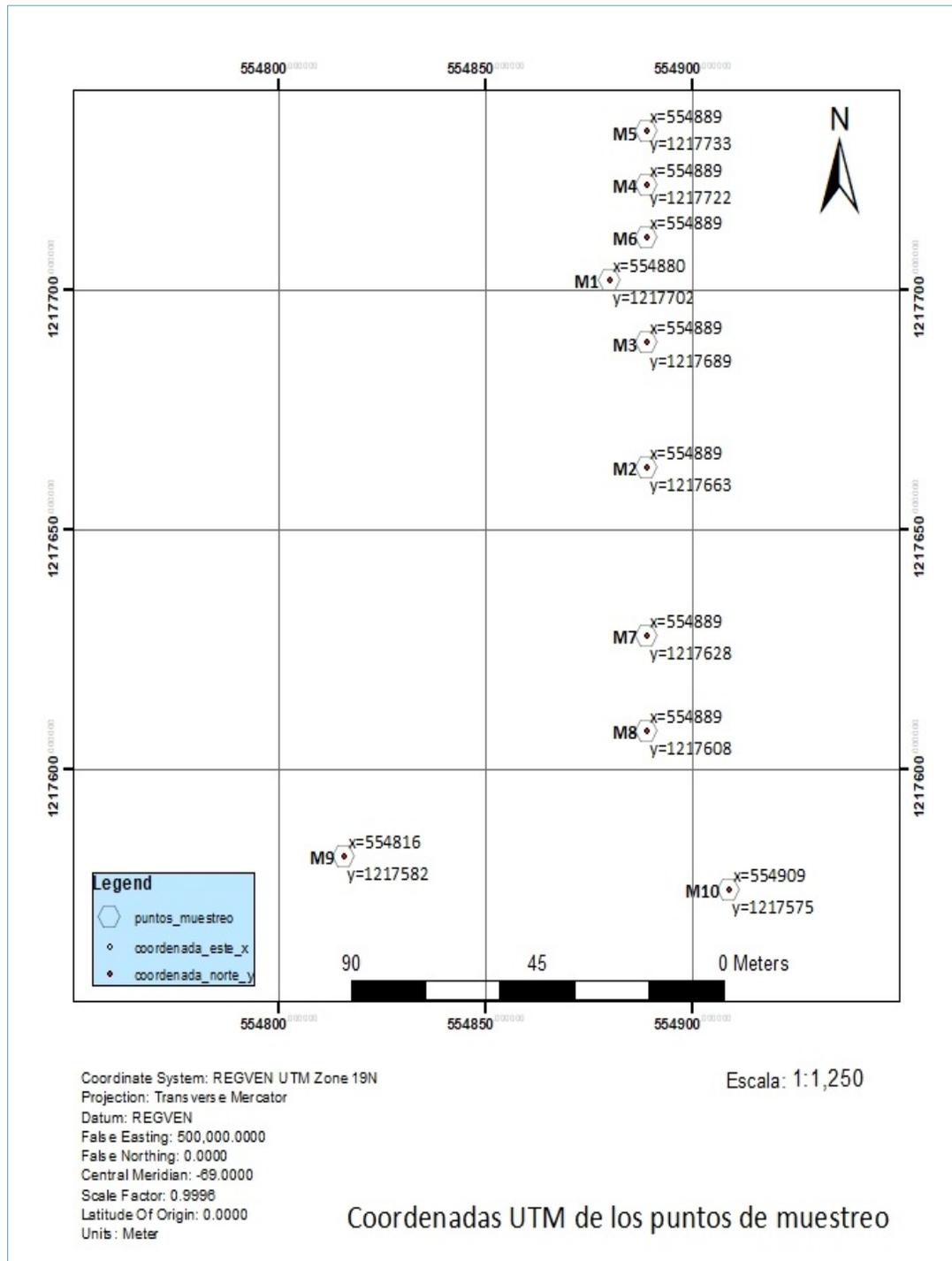


Figura 4.7 Ubicación de los puntos de muestreo

Las estadísticas de cada una de las variables medidas se muestran en el apéndice G. Los valores de las propiedades físico-químicas en cada una de los puntos muestreados se muestran en la tabla 4.4. El valor de los contenidos de metales en cada punto se presenta en la tabla 4.5.

Debido a que se desea evaluar la influencia de los hidrocarburos generados por el derrame del petróleo, se realizaron los diagramas de dispersión de todas las variables en función del porcentaje de TPH. En las figuras 4.8.a hasta la 4.8.g, se muestran las gráficas.

4.3.1 Análisis de los resultados de las propiedades físico-químicas del suelo

Los resultados de la medición de pH muestran suelos que se pueden catalogar de ácidos (ver tabla 2.1), aun cuando los resultados de M5, M8, M9 y M10 muestran valores de pH neutros o ligeramente alcalinos. Los valores altos de acidez, son compatibles con la contaminación por el derrame de petróleo en el suelo. Los hidrocarburos acidifican el medio, debido a la degradación de ácidos orgánicos (Armado y Noguera, 2010). Sin embargo, al evaluar el gráfico de dispersión del pH en función del porcentaje de TPH, no se observa correlación entre las variables. Para validar en forma numérica estas relaciones, se calculó las correlaciones entre las variables y se creó una matriz para determinar aquellas que están asociadas. (Ver apéndice B). Para los cálculos, se utilizó el coeficiente de correlación de Spearman (r_s), debido a que esta es una prueba no paramétrica que es menos susceptible a resultados aislados y se ajusta mejor que la correlación de Pearson para las relaciones no lineales (Berk & Carey, 2001).

Los valores críticos del coeficiente de Spearman, para pruebas de una cola para $n=5$, con $\alpha=0.05$, ($1-\alpha$ = coeficiente de confianza) es 0.9 (Ver anexo E). Estableciendo como hipótesis nula H_0 , que no existe correlación entre las variables evaluadas, se rechaza la hipótesis nula para las relaciones de: TPH con CE ($r_s = 1$); TPH con retención de

Tabla 4.4 Propiedades fisico-químicas de los suelos impactados con hidrocarburos en la zona en estudio

Muestra	pH1 1:1 H2O	pH2 1:1 KCl	CE [μScm^{-1}]	Humedad Relativa [%]	Retención Humedad [%]	% COT	CIC [meq/100g suelo]	Materia Or- gánica [%]	% TPH
M1	4,3 \pm 0,1	3,6 \pm 0,1	433 \pm 13	6,1 \pm 0,2	7 \pm 1	11,3 \pm 0,3	18,67 \pm 0,03	19,5 \pm 0,5	7,6 \pm 0,3
M2	4,70 \pm 0,03	3,70 \pm 0,01	464 \pm 16	4 \pm 1	60 \pm 2	5,7 \pm 0,4	117,0 \pm 0,3	9,8 \pm 0,3	NA
M3	4,65 \pm 0,04	3,89 \pm 0,04	277 \pm 39	5 \pm 2	8 \pm 2	8,8 \pm 0,9	7,01 \pm 0,04	15 \pm 2	7 \pm 1
M4	6,03 \pm 0,03	5,35 \pm 0,07	150 \pm 13	10 \pm 1	30 \pm 1	5,7 \pm 0,8	23,07 \pm 0,03	10 \pm 1	NA
M5	6,8 \pm 0,2	6,7 \pm 0,4	563 \pm 33	5 \pm 1	6 \pm 2	10,1 \pm 0,4	42,2 \pm 0,3	17,4 \pm 0,7	14 \pm 2
M6	5,5 \pm 0,2	4,80 \pm 0,05	343 \pm 58	8 \pm 1	15,8 \pm 0,5	1,6 \pm 0,1	55,3 \pm 0,3	2,8 \pm 0,2	NA
M7	5,3 \pm 0,4	4,6 \pm 0,2	86 \pm 1	7,1 \pm 0,4	8 \pm 2	12,3 \pm 0,1	41,9 \pm 0,2	22 \pm 2	5 \pm 2
M8	6,7 \pm 0,1	6,5 \pm 0,4	242 \pm 2	12 \pm 1	50 \pm 2	7,3 \pm 0,6	148,4 \pm 0,1	13 \pm 1	NA
M9	7,3 \pm 0,4	7,07 \pm 0,06	211 \pm 43	-	8 \pm 1	10 \pm 1	26,53 \pm 0,08	17 \pm 2	6,2 \pm 0,8
M10	7,6 \pm 0,6	7,5 \pm 0,2	186 \pm 57	8,6 \pm 0,2	50 \pm 2	2,9 \pm 0,3	105,99 \pm 0,06	5 \pm 0,5	NA

Nota: CO= carbono orgánico; CIC = capacidad de intercambio catiónico; TPH= Hidrocarburos totales de petróleo. *Fuente:* Armado y Noguera, (2010)

Tabla 4.5 Contenido total de metales medidos en las muestras de suelos impactados y no impactados con hidrocarburos de petróleo en la zona en estudio

Muestra	Mn [mg /kg]	Cd [mg /kg]	Cr [mg /kg]	Cu [mg /kg]	Co [mg /kg]	Zn [mg /kg]	Ni [mg /kg]	Fe [mg /kg]
M1	40 ±13	-	-	8 ± 1	6,9 ± 0,5	44 ± 14	11 ± 6	-
M2	69 ± 4	28 ± 2	-	23 ± 4	10 ± 2	102 ± 3	16,6 ± 0,6	44 ± 3
M3	45 ± 4	21 ± 2	43 ± 16	17 ± 6	8 ± 3	103 ± 16	41 ± 1	49 ± 2
M4	4,7 ± 0,2	20 ± 5	81 ± 36	13,1 ± 0,6	18 ± 1	75 ± 11	15 ± 10	49 ± 3
M5	51 ± 6	18 ± 4	26 ± 5	8,0 ± 0,5	7 ± 1	85 ± 5	4 ± 5	-
M6	65 ± 10	9,40 ± 0,03	38 ± 11	8,5 ± 0,3	6,8 ± 0,4	45 ± 3	11 ± 1	44 ± 9
M7	61 ± 2	14,37 ± 0,06	90 ± 30	9 ± 2	7 ± 2	57 ± 14	-	42,3 ± 0,2
M8	156 ± 104	15,10 ± 0,25	-	-	19 ± 4	-	-	153 ± 19
M9	59 ± 3	14,11 ± 0,05	-	-	-	6,03 ± 0,02	-	38 ± 7
M10	90 ± 2	12 ± 2	120 ± 15	9,3 ± 0,8	9 ± 1	144 ± 13	109 ± 29	115 ± 7

Fuente: Armado y Noguera (2010)

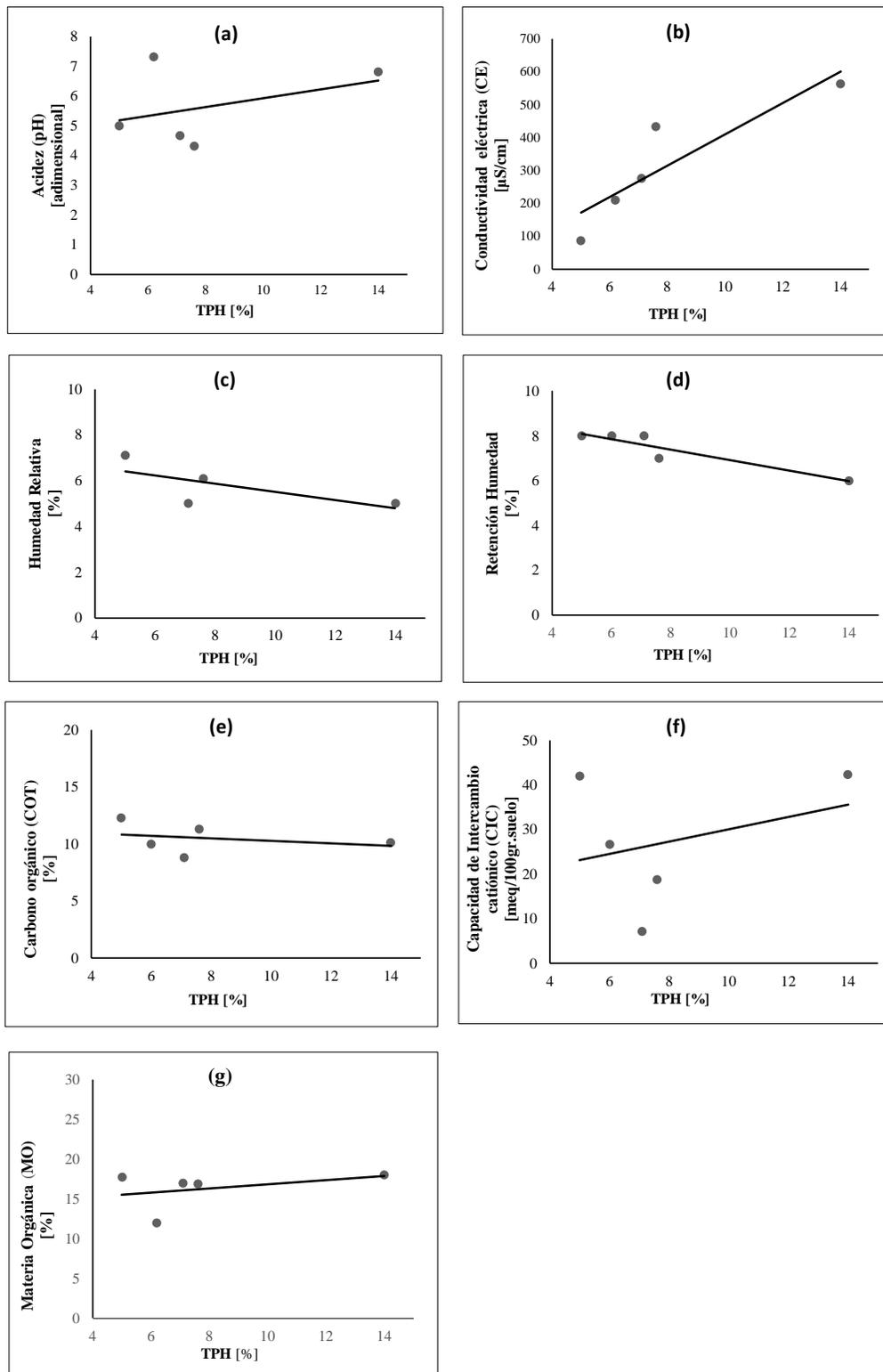


Figura 4.8 Gráficos de dispersión de las variables físico-químicas en función del porcentaje de TPH

humedad ($r_s = -0,90$) ; CE con la retención de humedad ($r_s = -0,90$) y humedad relativa con CO ($r_s = 1$).

La conductividad eléctrica depende de la cantidad de sales disueltas en el suelo, por lo cual la correlación positiva que presenta con el porcentaje de TPH, parece estar más relacionada con la composición de los suelos en sí que con la contaminación por hidrocarburos, por cuanto los resultados de CE de las muestras control M2 y M6, en zonas no contaminadas muestran también una elevada conductividad.

La correlación negativa de retención de humedad con el TPH, posiblemente se debe a la textura arenosa del suelo y al hecho de que los derrames de petróleo forman una capa delgada de material meteorizado en la superficie, que impide el paso del agua (Corrales y Guanipa, 2016).

De acuerdo con los resultados, el TPH tiene poca influencia sobre el resto de las variables físico-químicas, aceptando la hipótesis nula para todas las relaciones.

En la figura 4.9 se presentan los gráficos de dispersión de los metales en función del %TPH.

En el caso de los metales, las gráficas no mostraron ninguna correlación con el TPH. El coeficiente de correlación de Spearman aplica para muestras con n entre 5 y 30. En la data utilizada, no se reportan algunos datos de medición de metales por valores no reproducibles de acuerdo con lo reportado por Armado y Noguera (2010), con lo cual fue imposible determinar la correlación de Spearman. Estos fueron los casos del Cr, Ni, y Fe. Se calculó r_s para el resto de los metales y los resultados fueron: Mn= 0,7; Cd = 0,3; Cu = -0,3; y Zn = 0.3, aceptando la hipótesis nula en todos los casos.

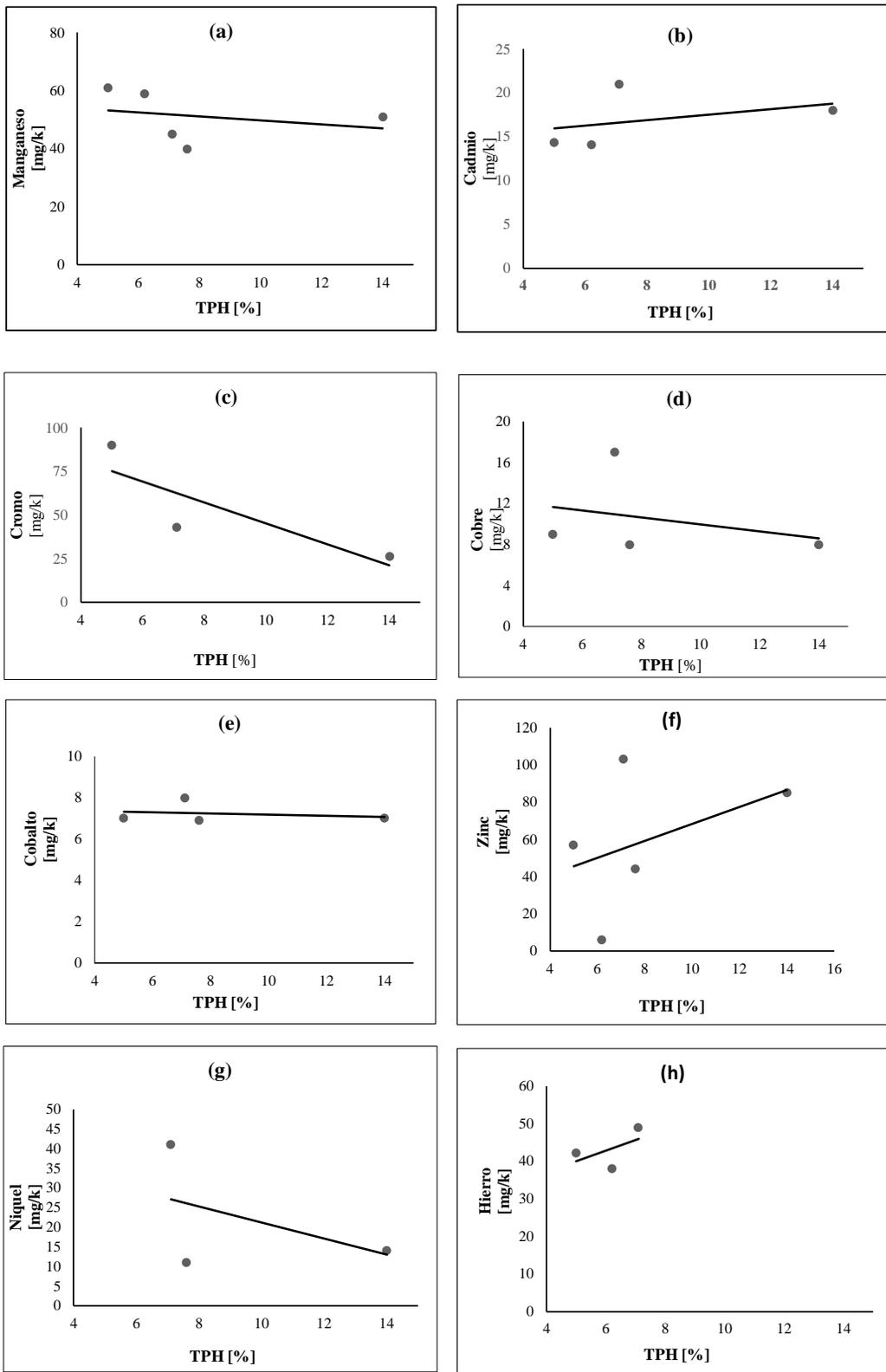


Figura 4.9 Gráficos de dispersión de los metales vs porcentaje de TPH.

4.3.2 Análisis de riesgo

La primera evaluación realizada una vez obtenidos los resultados del muestreo, fue para determinar si las variables se encuentran dentro de los límites permisibles de las normativas técnicas y legales aplicables. De acuerdo a lo especificado en la tabla 3.2, capítulo 3, el decreto 2635, solo estipula límites para el cadmio, el cromo y el zinc. En el caso de estudio, además de obtener las muestras contaminadas con TPH, solo se obtuvo un valor fuera de especificaciones para el caso del cadmio (Cd). De allí que se consideró de acuerdo con el modelo conceptual (figura 4.6) evaluar la toxicidad de todos los metales y del TPH a los receptores humanos por cada vía de exposición.

En la tabla 4.6, se presentan los resultados de los cálculos del riesgo cancerígeno y no cancerígenos para ingestión, inhalación y contacto dérmico, de los compuestos de interés para los receptores humanos. Se utilizó el modelo presentado por Rihm y Anacona 2004, y utilizado por Corrales y Guanipa (2016), para el análisis del caso Yaracal con las fórmulas presentadas en las ecuaciones 3.7; 3.8 y 3.9 respectivamente en cada caso. Los parámetros para cada fórmula y las dosis de referencia utilizadas se encuentran tabuladas en el anexo F.

Para el caso del TPH y del hierro, no se pudo calcular el HQ, debido a que no se cuenta con un valor de dosis de referencia, para ninguna de las vías de exposición. El mismo caso ocurrió para el cromo, zinc, y níquel en las dosis de referencia por inhalación. Se revisó la literatura y no se logró obtener valores de dosis de referencia especificados. Tampoco se encontraron NOAEL y estudios comprobados para poder obtener los valores de incertidumbre para el cálculo. Los informes toxicológicos de la agencia de sustancias tóxicas y registro de enfermedades de los Estados Unidos de América (ATSDR), no tiene dosis de referencia reportadas para esos casos específicos pese a contar con múltiples reportes toxicológicos para diversas sustancias.

El TPH, representa la cantidad de hidrocarburos presentes en una muestra dada y puede tener presencia de hasta 250 químicos diferentes, por lo cual la evaluación de los efectos a la salud, requiere información toxicológica para cada uno de esos químicos. La ATDSR, ha desarrollado perfiles toxicológicos para algunos contaminantes específicos presentes en los TPH, como el benceno, el tolueno, el xileno entre otros, pero los TPH no han sido estudiados intensivamente. El caso del hierro, es representativo porque es un micronutriente requerido en la dieta de los seres humanos y no se han demostrado efectos adversos de la ingesta de alimentos con alto contenido de este metal excepto que existan patologías diagnosticadas. (García et al. 2008). Adicionalmente no ha sido posible establecer un NOAEL, ni tampoco un LOAEL, debido a la insuficiencia de datos experimentales o de observación.

El riesgo de que el receptor humano pueda contraer cáncer, se encuentra por encima de lo “aceptable”, (1×10^5) para el caso de riesgo cancerígeno por ingestión accidental y por contacto dérmico para el TPH. Para el resto de los casos de este y todos los demás compuestos, no existe riesgo cancerígeno o no cancerígeno. Sin embargo, los resultados del TPH, plantean la necesidad de elaborar un plan para tomar otras acciones que pueden ser: un muestreo más intensivo para confirmar los hallazgos o el establecimiento de una estrategia de saneamiento.

Tabla.4.6 Caracterización del riesgo

Compuesto de Interés (CDI) [mg/kg]	Riesgo por Ingestión				Riesgo por Inhalación				Riesgo por Contacto Dérmico				
	No cancerígeno		Cancerígeno		No cancerígeno		Cancerígeno		No cancerígeno		Cancerígeno		
	HQ Ingestion	error	Riesgo cancer	error	HQ Inhalación	error	Riesgo cancer	error	HQ Cont. Derm.	error	Riesgo cancer	error	
HTP													
M1	7600,0 ± 0.3	----	----	1.04E-04	4.11E-09	----	----	1.98E-08	7.81E-13	----	----	5.52E-05	2.18E-09
M2	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----
M3	7000 ± 1	----	----	9.59E-05	1.37E-08	----	----	1.82E-08	2.60E-12	----	----	5.08E-05	7.26E-09
M4	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----
M5	14000 ± 2	----	----	1.92E-04	2.74E-08	----	----	3.64E-08	5.20E-12	----	----	1.02E-04	1.45E-08
M6	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----
M7	5000 ± 2	----	----	6.85E-05	2.74E-08	----	----	1.30E-08	5.20E-12	----	----	3.63E-05	1.45E-08
M8	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----
M9	6200,0 ± 0.8	----	----	8.49E-05	1.10E-08	----	----	1.61E-08	2.08E-12	----	----	4.50E-05	5.81E-09
M10	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----
Manganeso													
M1	40 ± 13	2.28E-03	7.42E-04	5.48E-07	1.78E-07	7.43E-04	2.42E-04	1.04E-10	3.38E-11	1.21E-03	3.93E-04	2.90E-07	9.44E-08
M2	69 ± 4	3.94E-03	2.28E-04	9.45E-07	5.48E-08	7.43E-04	4.31E-05	1.04E-08	6.03E-12	2.09E-03	1.21E-04	5.01E-07	2.90E-08
M3	45 ± 4	2.57E-03	2.28E-04	6.16E-07	5.48E-08	1.28E-03	1.14E-04	1.80E-08	1.60E-11	1.36E-03	1.21E-04	3.27E-07	2.90E-08
M4	4.7 ± 0.2	2.68E-04	1.14E-05	6.44E-08	2.74E-09	8.36E-04	3.56E-05	1.17E-08	4.98E-12	1.42E-04	6.05E-06	3.41E-08	1.45E-09
M5	51 ± 6	2.91E-03	3.42E-04	6.99E-07	8.22E-08	8.73E-05	1.03E-05	1.22E-09	1.44E-12	1.54E-03	1.82E-04	3.70E-07	4.36E-08
M6	65 ± 10	3.71E-03	5.71E-04	8.90E-07	1.37E-07	9.48E-04	1.46E-04	1.33E-08	2.04E-11	1.97E-03	3.03E-04	4.72E-07	7.26E-08
M7	61 ± 2	3.48E-03	1.14E-04	8.36E-07	2.74E-08	1.21E-03	3.96E-05	1.69E-08	5.54E-12	1.85E-03	6.05E-05	4.43E-07	1.45E-08
M8	156 ± 104	8.90E-03	5.94E-03	2.14E-06	1.42E-06	1.13E-03	7.56E-04	1.59E-08	1.06E-10	4.72E-03	3.15E-03	1.13E-06	7.55E-07
M9	59 ± 3	3.37E-03	1.71E-04	8.08E-07	4.11E-08	2.90E-03	1.47E-04	4.06E-08	2.06E-11	1.78E-03	9.08E-05	4.28E-07	2.18E-08
M10	90 ± 2	5.14E-03	1.14E-04	1.23E-06	2.74E-08	1.10E-03	2.44E-05	1.54E-08	3.41E-12	2.72E-03	6.05E-05	6.53E-07	1.45E-08
Cadmio													
M1	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----
M2	28 ± 2	3.84E-02	2.74E-03	3.84E-07	2.74E-08	----	----	----	----	2.03E-02	1.45E-03	2.03E-07	1.45E-08
M3	21 ± 2	2.88E-02	2.74E-03	2.88E-07	2.74E-08	1.28E-03	1.22E-04	7.29E-09	6.94E-12	1.52E-02	1.45E-03	1.52E-07	1.45E-08
M4	20 ± 5	2.74E-02	6.85E-03	2.74E-07	6.85E-08	9.59E-04	2.40E-04	5.46E-09	1.37E-11	1.45E-02	3.63E-03	1.45E-07	3.63E-08
M5	18 ± 4	2.47E-02	5.48E-03	2.47E-07	5.48E-08	9.13E-04	2.03E-04	5.20E-09	1.16E-11	1.31E-02	2.90E-03	1.31E-07	2.90E-08
M6	9.4 ± 0.03	1.29E-02	4.11E-05	1.29E-07	4.11E-10	8.22E-04	2.62E-06	4.68E-09	1.49E-13	6.82E-03	2.18E-05	6.82E-08	2.18E-10
M7	14.37 ± 0.06	1.97E-02	8.22E-05	1.97E-07	8.22E-10	4.29E-04	1.79E-06	2.45E-09	1.02E-13	1.04E-02	4.36E-05	1.04E-07	4.36E-10
M8	15.10 ± 0.25	2.07E-02	3.42E-04	2.07E-07	3.42E-09	6.56E-04	1.09E-05	3.74E-09	6.19E-13	1.10E-02	1.82E-04	1.10E-07	1.82E-09
M9	14.11 ± 0.05	1.93E-02	6.85E-05	1.93E-07	6.85E-10	6.89E-04	2.44E-06	3.93E-09	1.39E-13	1.02E-02	3.63E-05	1.02E-07	3.63E-10
M10	12 ± 2	1.64E-02	2.74E-03	1.64E-07	2.74E-08	6.44E-04	1.07E-04	3.67E-09	6.12E-12	8.71E-03	1.45E-03	8.71E-08	1.45E-08

Tabla 4.6 Continuación. Caracterización del riesgo

Compuesto de Interés (CDI) [mg/kg]	Riesgo por Ingestión				Riesgo por Inhalación				Riesgo por Contacto Dérmico				
	No cancerígeno		Cancerígeno		No cancerígeno		Cancerígeno		No cancerígeno		Cancerígeno		
	HQ Ingestion	error	Riesgo cancer	error	HQ Inhalación	error	Riesgo cancer	error	HQ Cont. Derm.	error	Riesgo cancer	error	
Cromo													
M1	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----
M2	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----
M3	43 ± 16	5.11E+07	1.46E-05	5.89E-07	2.19E-07	----	----	1.12E-08	4.16E-11	2.08E-05	7.74E-06	3.12E-07	1.16E-07
M4	81 ± 36	5.11E+07	3.29E-05	1.11E-06	4.93E-07	----	----	2.11E-08	9.37E-11	3.92E-05	1.74E-05	5.88E-07	2.61E-07
M5	26 ± 5	5.11E+07	4.57E-06	3.56E-07	6.85E-08	----	----	6.76E-09	1.30E-11	1.26E-05	2.42E-06	1.89E-07	3.63E-08
M6	38 ± 11	5.11E+07	1.00E-05	5.21E-07	1.51E-07	----	----	9.89E-09	2.86E-11	1.84E-05	5.32E-06	2.76E-07	7.99E-08
M7	90 ± 30	5.11E+07	2.74E-05	1.23E-06	4.11E-07	----	----	2.34E-08	7.81E-11	4.36E-05	1.45E-05	6.53E-07	2.18E-07
M8	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----
M9	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----
M10	120 ± 15	5.11E+07	1.37E-05	1.64E-06	2.05E-07	----	----	3.12E-08	3.90E-11	5.81E-05	7.26E-06	8.71E-07	1.09E-07
Cobre													
M1	8 ± 1	----	----	1.04E-03	1.37E-08	----	----	2.08E-09	2.60E-12	1.45E-04	1.82E-05	5.81E-08	7.26E-09
M2	23 ± 4	----	----	----	----	----	----	5.98E-09	1.04E-11	4.17E-04	7.26E-05	1.67E-07	2.90E-08
M3	17 ± 6	----	----	9.59E-04	8.22E-08	----	----	4.42E-09	1.56E-11	3.09E-04	1.09E-04	1.23E-07	4.36E-08
M4	13.1 ± 0.6	----	----	----	----	----	----	3.41E-09	1.56E-12	2.38E-04	1.09E-05	9.51E-08	4.36E-09
M5	8 ± 0.5	----	----	1.92E-03	6.85E-09	----	----	2.08E-09	1.30E-12	1.45E-04	9.08E-06	5.81E-08	3.63E-09
M6	8.5 ± 0.3	----	----	----	----	----	----	2.21E-09	7.81E-13	1.54E-04	5.45E-06	6.17E-08	2.18E-09
M7	9 ± 2	----	----	6.85E-04	2.74E-08	----	----	2.34E-09	5.20E-12	1.63E-04	3.63E-05	6.53E-08	1.45E-08
M8	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----
M9	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----
M10	9.3 ± 0.8	----	----	----	----	----	----	2.42E-09	2.08E-12	1.69E-04	1.45E-05	6.75E-08	5.81E-09
Cobalto													
M1	6.9 ± 0.5	4.73E-04	3.42E-05	9.45E-08	6.85E-09	3.15E-04	4.56E-05	1.80E-09	2.60E-12	2.50E-04	1.82E-05	5.01E-08	3.63E-09
M2	10 ± 2	6.85E-04	1.37E-04	1.37E-07	2.74E-08	4.56E-04	1.83E-04	2.60E-09	1.04E-11	3.63E-04	7.26E-05	7.26E-08	1.45E-08
M3	8 ± 3	5.48E-04	2.05E-04	1.10E-07	4.11E-08	3.65E-04	2.74E-04	2.08E-09	1.56E-11	2.90E-04	1.09E-04	5.81E-08	2.18E-08
M4	18 ± 1	1.23E-03	6.85E-05	2.47E-07	1.37E-08	8.22E-04	9.13E-05	4.68E-09	5.20E-12	6.53E-04	3.63E-05	1.31E-07	7.26E-09
M5	7 ± 1	4.79E-04	6.85E-05	9.59E-08	1.37E-08	3.20E-04	9.13E-05	1.82E-09	5.20E-12	2.54E-04	3.63E-05	5.08E-08	7.26E-09
M6	6.8 ± 0.4	4.66E-04	2.74E-05	9.32E-08	5.48E-09	3.10E-04	3.65E-05	1.77E-09	2.08E-12	2.47E-04	1.45E-05	4.94E-08	2.90E-09
M7	7 ± 2	4.79E-04	1.37E-04	9.59E-08	2.74E-08	3.20E-04	1.83E-04	1.82E-09	1.04E-11	2.54E-04	7.26E-05	5.08E-08	1.45E-08
M8	19 ± 4	1.30E-03	2.74E-04	2.60E-07	5.48E-08	8.67E-04	3.65E-04	4.94E-09	2.08E-11	6.90E-04	1.45E-04	1.38E-07	2.90E-08
M9	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----
M10	9 ± 1	6.16E-04	6.85E-05	1.23E-07	1.37E-08	4.11E-04	9.13E-05	2.34E-09	5.20E-12	3.27E-04	3.63E-05	6.53E-08	7.26E-09

Tabla 4.6 Continuación. Caracterización del riesgo

Compuesto de Interés (CDI) [mg/kg]	Riesgo por Ingestión				Riesgo por Inhalación				Riesgo por Contacto Dérmico				
	No cancerígeno		Cancerígeno		No cancerígeno		Cancerígeno		No cancerígeno		Cancerígeno		
	HQ Ingestion	error	Riesgo cancer	error	HQ Inhalación	error	Riesgo cancer	error	HQ Cont. Derm.	error	Riesgo cancer	error	
Zinc													
M1	44 ± 14	2.01E-04	6.39E-05	6.03E-07	1.92E-07	-----	-----	1.14E-08	3.64E-11	1.06E-04	3.39E-05	-----	-----
M2	102 ± 3	4.66E-04	1.37E-05	1.40E-06	4.11E-08	-----	-----	2.65E-08	7.81E-12	2.47E-04	7.26E-06	2.03E-07	1.45E-08
M3	103 ± 16	4.70E-04	7.31E-05	1.41E-06	2.19E-07	-----	-----	2.68E-08	4.16E-11	2.49E-04	3.87E-05	1.52E-07	1.45E-08
M4	75 ± 11	3.42E-04	5.02E-05	1.03E-06	1.51E-07	-----	-----	1.95E-08	2.86E-11	1.82E-04	2.66E-05	1.45E-07	3.63E-08
M5	85 ± 5	3.88E-04	2.28E-05	1.16E-06	6.85E-08	-----	-----	2.21E-08	1.30E-11	2.06E-04	1.21E-05	1.31E-07	2.90E-08
M6	45 ± 3	2.05E-04	1.37E-05	6.16E-07	4.11E-08	-----	-----	1.17E-08	7.81E-12	1.09E-04	7.26E-06	6.82E-08	2.18E-10
M7	57 ± 14	2.60E-04	6.39E-05	7.81E-07	1.92E-07	-----	-----	1.48E-08	3.64E-11	1.38E-04	3.39E-05	1.04E-07	4.36E-10
M8	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	1.10E-07	1.82E-09
M9	6.03 ± 0.02	2.75E-05	9.13E-08	8.26E-08	2.74E-10	-----	-----	1.57E-09	5.20E-14	1.46E-05	4.84E-08	1.02E-07	3.63E-10
M10	144 ± 13	6.58E-04	5.94E-05	1.97E-06	1.78E-07	-----	-----	3.75E-08	3.38E-11	3.48E-04	3.15E-05	8.71E-08	1.45E-08
Niquel													
M1	11 ± 6	7.53E-04	4.11E-04	1.04E-03	8.22E-08	-----	-----	2.86E-09	1.56E-11	3.99E-04	2.18E-04	7.99E-08	4.36E-08
M2	16.6 ± 0.6	1.14E-03	4.11E-05	#i VALOR!	8.22E-09	-----	-----	4.32E-09	1.56E-12	6.03E-04	2.18E-05	1.21E-07	4.36E-09
M3	41 ± 1	2.81E-03	6.85E-05	9.59E-04	1.37E-08	-----	-----	1.07E-08	2.60E-12	1.49E-03	3.63E-05	2.98E-07	7.26E-09
M4	15 ± 10	1.03E-03	6.85E-04	-----	-----	-----	-----	3.90E-09	2.60E-11	5.45E-04	3.63E-04	1.09E-07	7.26E-08
M5	14 ± 5	9.59E-04	3.42E-04	1.92E-03	6.85E-08	-----	-----	3.64E-09	1.30E-11	5.08E-04	1.82E-04	1.02E-07	3.63E-08
M6	11 ± 1	7.53E-04	6.85E-05	-----	-----	-----	-----	2.86E-09	2.60E-12	3.99E-04	3.63E-05	7.99E-08	7.26E-09
M7	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
M8	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
M9	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
M10	109 ± 29	7.47E-03	1.99E-03	-----	-----	-----	-----	2.84E-08	7.55E-11	3.96E-03	1.05E-03	7.91E-07	2.11E-07
Hierro													
M1	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
M2	44 ± 3	-----	-----	6.03E-07	4.11E-08	-----	-----	1.14E-08	7.81E-12	-----	-----	3.19E-07	2.18E-08
M3	49 ± 2	-----	-----	6.71E-07	2.74E-08	-----	-----	1.27E-08	5.20E-12	-----	-----	3.56E-07	1.45E-08
M4	49 ± 3	-----	-----	6.71E-07	4.11E-08	-----	-----	1.27E-08	7.81E-12	-----	-----	3.56E-07	2.18E-08
M5	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
M6	44 ± 9	-----	-----	6.03E-07	1.23E-07	-----	-----	1.14E-08	2.34E-11	-----	-----	3.19E-07	6.53E-08
M7	42.3 ± 0.2	-----	-----	5.79E-07	2.74E-09	-----	-----	1.10E-08	5.20E-13	-----	-----	3.07E-07	1.45E-09
M8	153 ± 19	-----	-----	2.10E-06	2.60E-07	-----	-----	3.98E-08	4.94E-11	-----	-----	1.11E-06	1.38E-07
M9	38 ± 7	-----	-----	5.21E-07	9.59E-08	-----	-----	9.89E-09	1.82E-11	-----	-----	2.76E-07	5.08E-08
M10	115 ± 7	-----	-----	1.58E-06	9.59E-08	-----	-----	2.99E-08	1.82E-11	-----	-----	-----	-----

4.4 Establecer la distribución de los contaminantes en el suelo utilizando sistemas de información geográfica.

En la sección anterior, se presentó la evaluación estadística de los datos y se determinaron las correlaciones entre las variables. Para hacer los mapas de distribución de los contaminantes, se requiere tener datos de muestreo de las variables en toda el área impactada o hacer predicciones geoestadísticas con base en las muestra recolectadas durante el muestreo. Para realizar predicciones geoestadísticas, se requiere la comprobación de la autocorrelación espacial de cada una de ellas. Sin embargo, debido a la cantidad de datos disponibles ($N=10$), no se cuenta con suficientes pares de muestras separadas distancias $h, 2h, \dots, nh$, que permitan la construcción de un variograma experimental. Para este caso en particular, se generaron los mapas con el método inverso ponderado de la distancia (IDW), el cual considera de manera implícita la correlación espacial entre los datos.

El método IDW, calcula los valores de cada celda, mediante la combinación ponderada linealmente de un conjunto de puntos. Este modelo considera que la variable que se representa cartográficamente va disminuyendo su influencia a medida que se aleja de la muestra y los mejores resultados se obtienen cuando el muestreo es lo suficientemente denso con respecto a la variación local que está intentando simular (ESRI®, 2016), sin embargo autores como Li H&Heap (2008), lo recomiendan para bases de datos pequeñas. Este método no contempla el cálculo de los errores de la predicción, la alternativa para validar el método una vez aplicado, es realizando validación cruzada.

Se elaboraron los mapas de distribución de pH, CE, humedad relativa, retención de humedad, carbono orgánico, capacidad de intercambio catiónico, materia orgánica y porcentaje deTPH. Figuras 4.10 a la 4.16 . En lo referente a los metales, se elaboraron los mapas de distribución de manganeso, cadmio, cromo, cobre, cobalto, zinc, níquel, y hierro (figuras 4.17 a 4.24).

Para la construcción de estos mapas se utilizó el ArcGis®ArcMap™ versión 10.4 de Esri y se utilizaron los resultados obtenidos del muestreo en cada caso sin excluir puntos. En los mapas resultantes se observa una marcada tendencia a tener el efecto denominado “ojo de buey” alrededor de los puntos de datos. Esto se genera debido a que el IDW, considera que los valores mas cercanos tienen mayor influencia sobre los puntos a medir que aquellos que están mas apartados. Basados en el hecho de que se está considerando la dependencia espacial de los datos, eso es congruente con los resultados. Los valores de las predicciones están limitados entre el valor máximo y el mínimo de los puntos medidos.

Para el caso de la distribución del porcentaje de TPH, se observa claramente el efecto de los punto de control , en los cuáles no se detectó la presencia de hidrocarburos totales de petróleo.

En la aplicación del método, se utilizó el parámetro de búsqueda de los vecinos “standard”, este valor define cuáles de los puntos que rodean al punto en evaluación serán considerados para hacer las predicciones.

Desde el punto de vista matemático, el IDW, se considera más efectivo con bases de datos de muestreo muy grandes, debido a que mejora la efectividad de los cálculos. Para esos casos adicionalmente se puede construir el semivariograma experimental y validar la dependencia que se asume en el IDW y utilizar las bondades de los métodos geoestadístico y comparar los resultados.

En el resto de los mapas, es marcada la influencia de los valores de los puntos de medición y como disminuye su influencia a medida que aumenta la distancia.

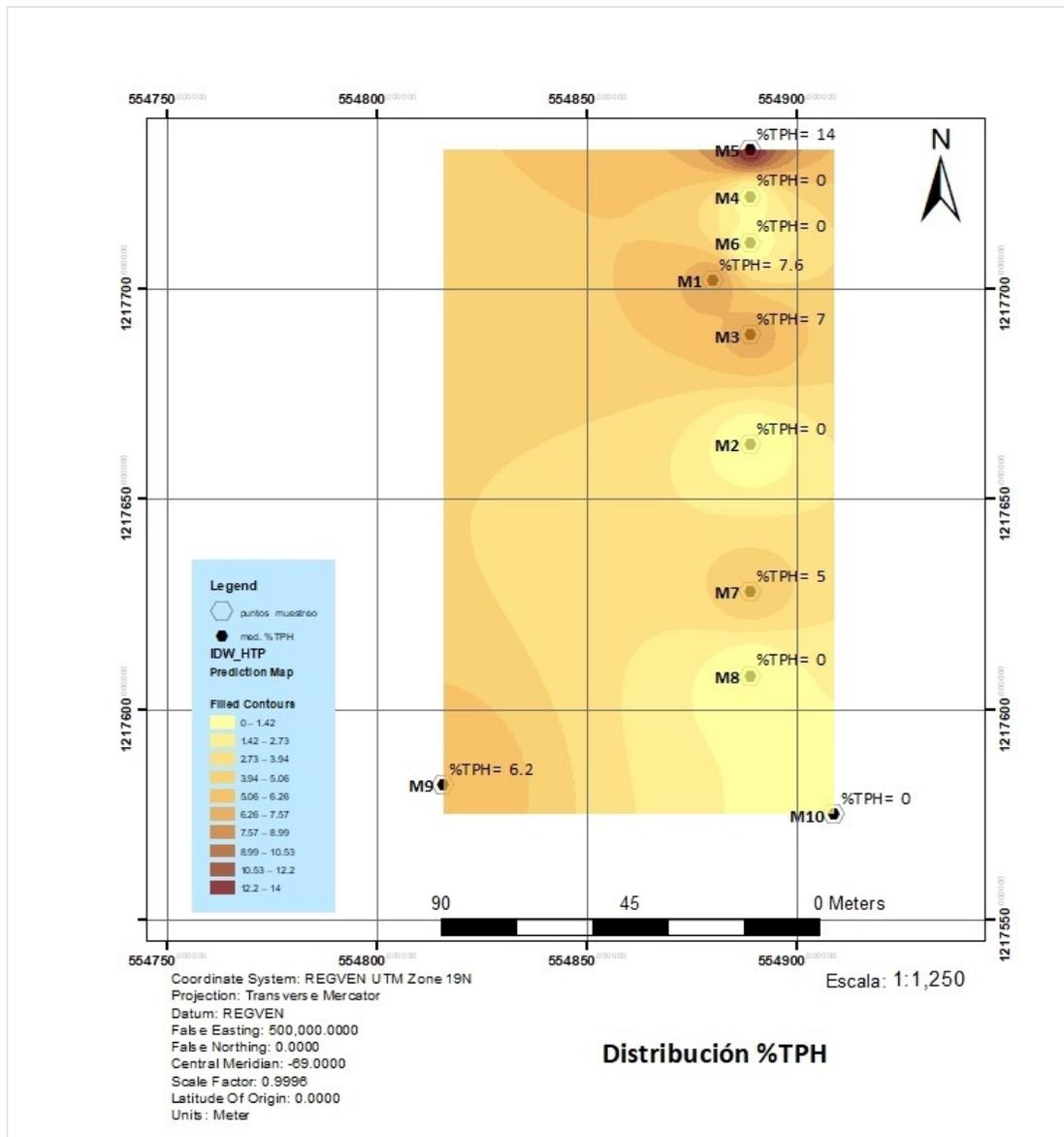


Figura 4.10 Mapa de distribución del porcentaje de TPH, utilizando método de interpolación IDW

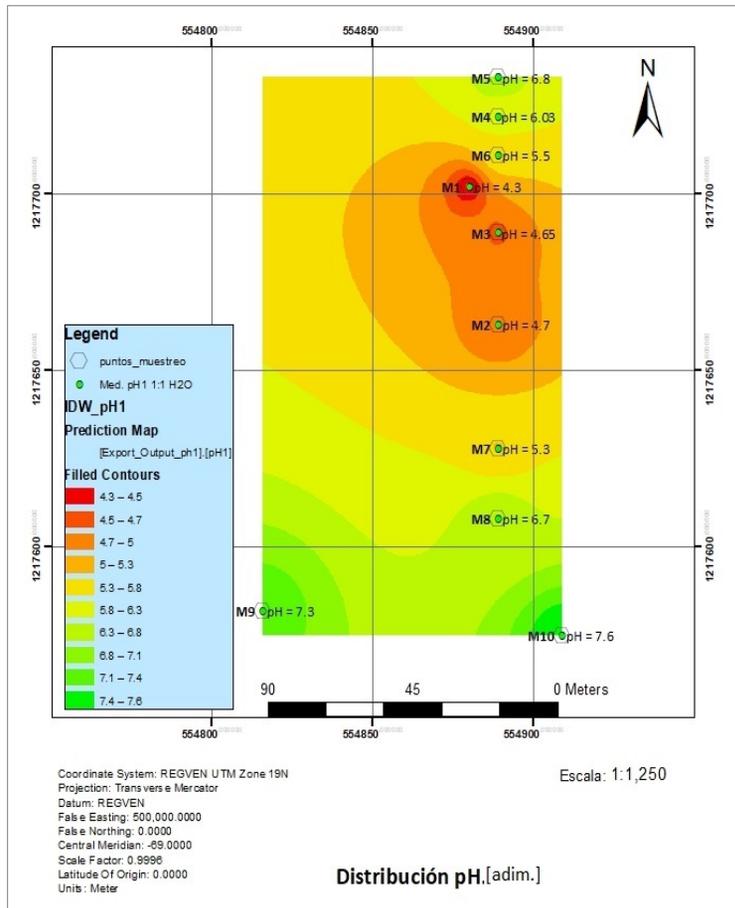


Figura 4.11 Mapa de distribución de pH, utilizando interpolación IDW

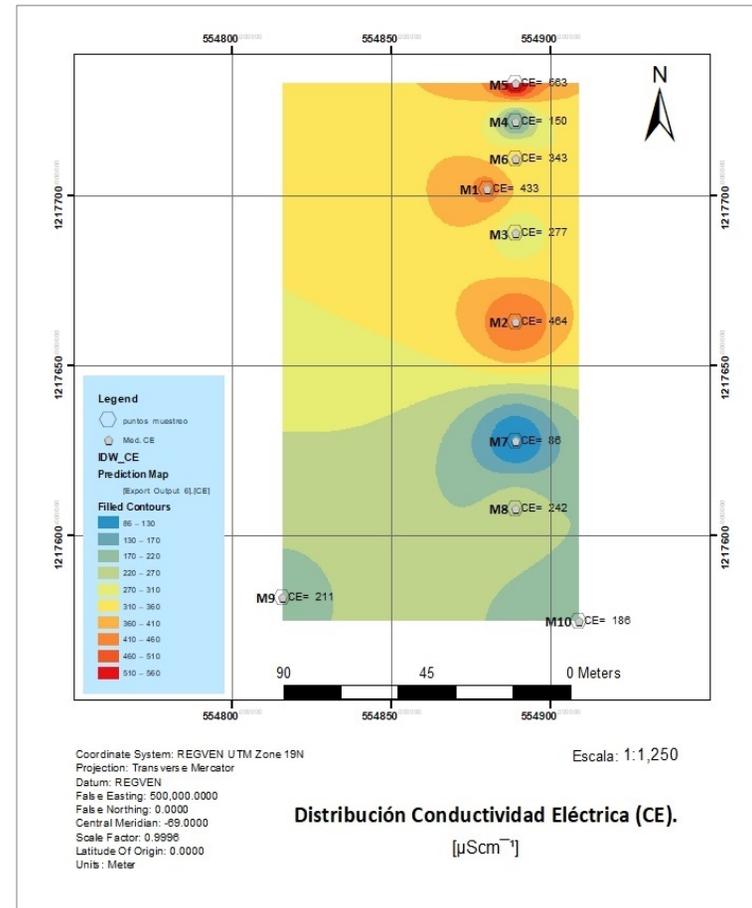


Figura 4.12 Mapa de distribución de conductividad eléctrica, utilizando interpolación IDW

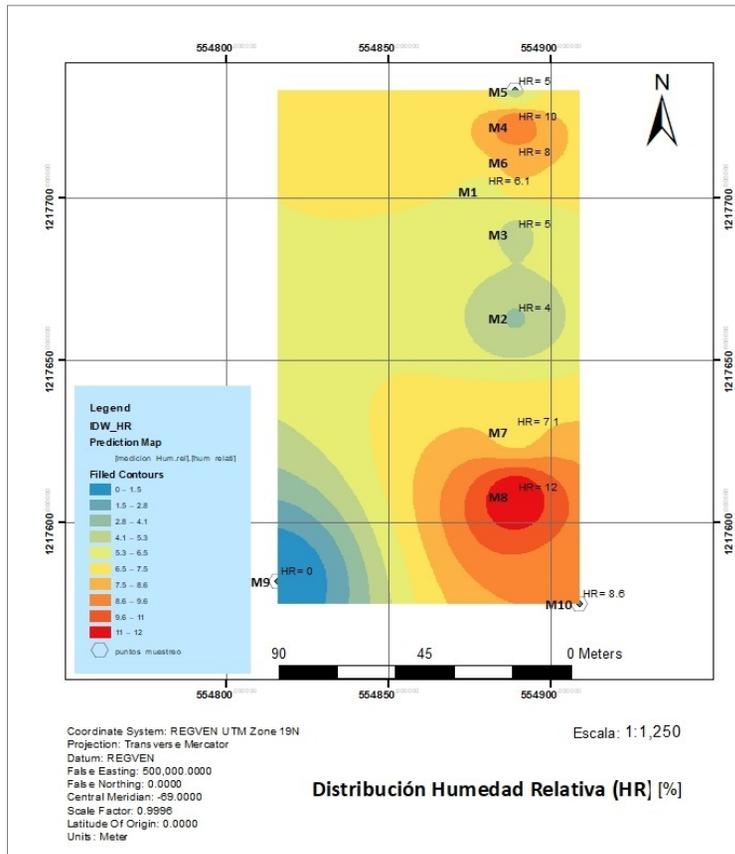


Figura 4.13 Mapa de distribución de humedad relativa, utilizando interpolación IDW

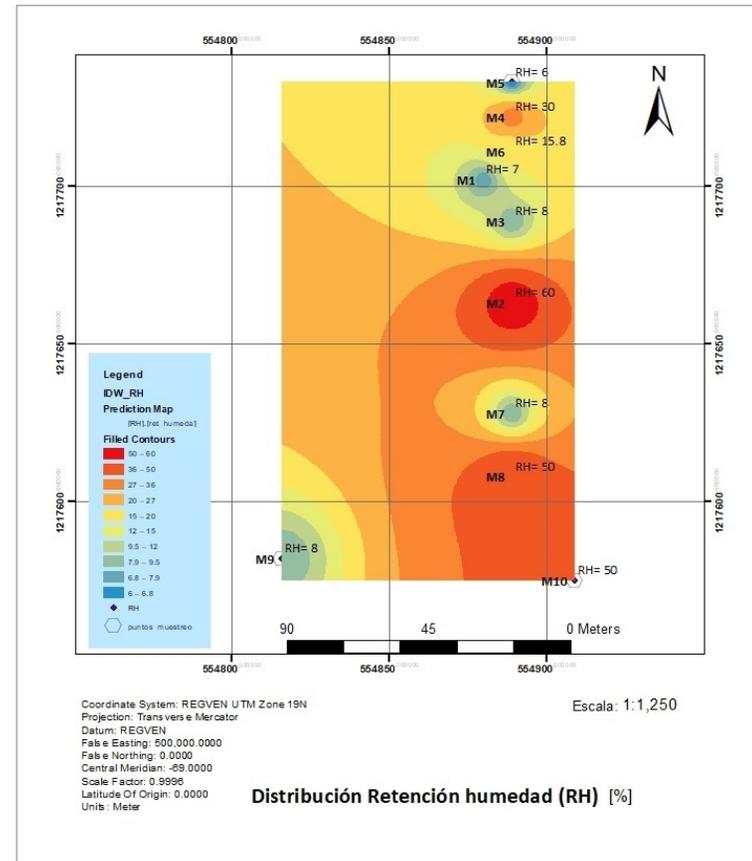


Figura 4.14 Mapa de distribución de CE, utilizando interpolación IDW

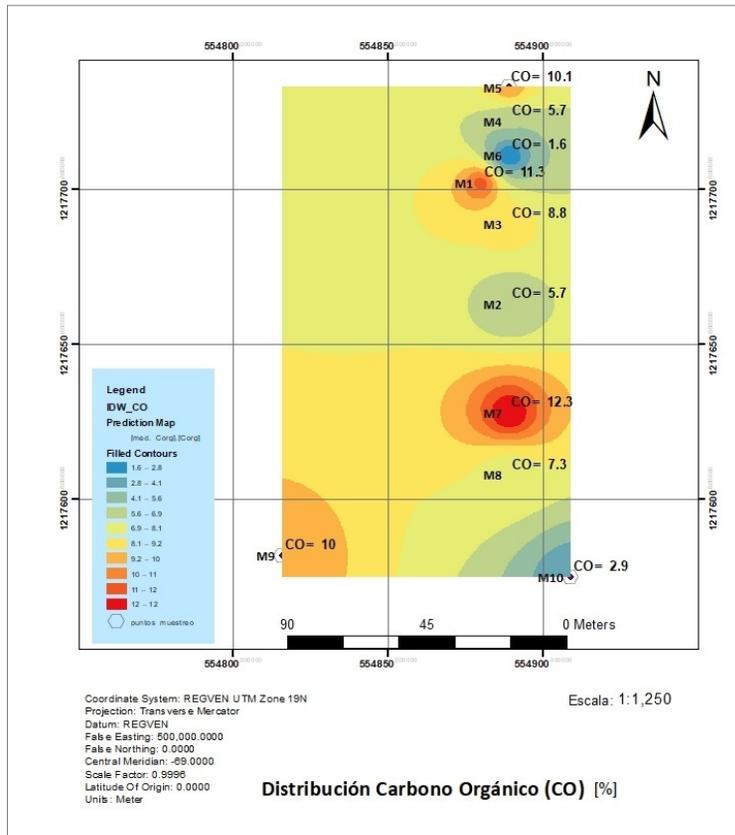


Figura 4.15 Mapa de distribución de carbono orgánico, utilizando interpolación IDW

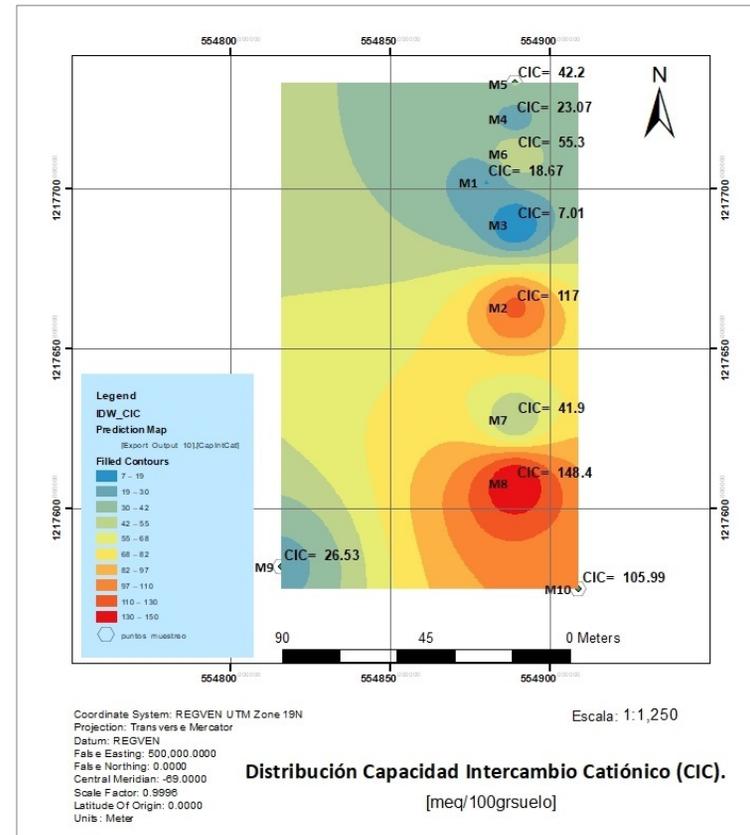


Figura 4.16 Mapa de distribución de la capacidad de intercambio catiónico, utilizando interpolación IDW

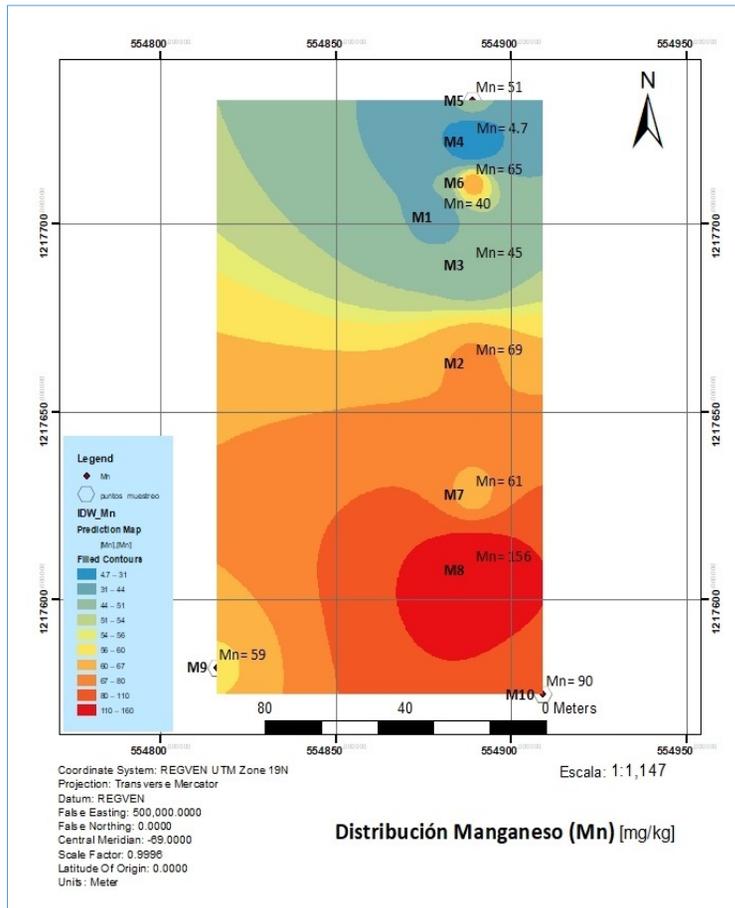


Figura 4.17 Mapa de distribución de manganeso, utilizando interpolación IDW

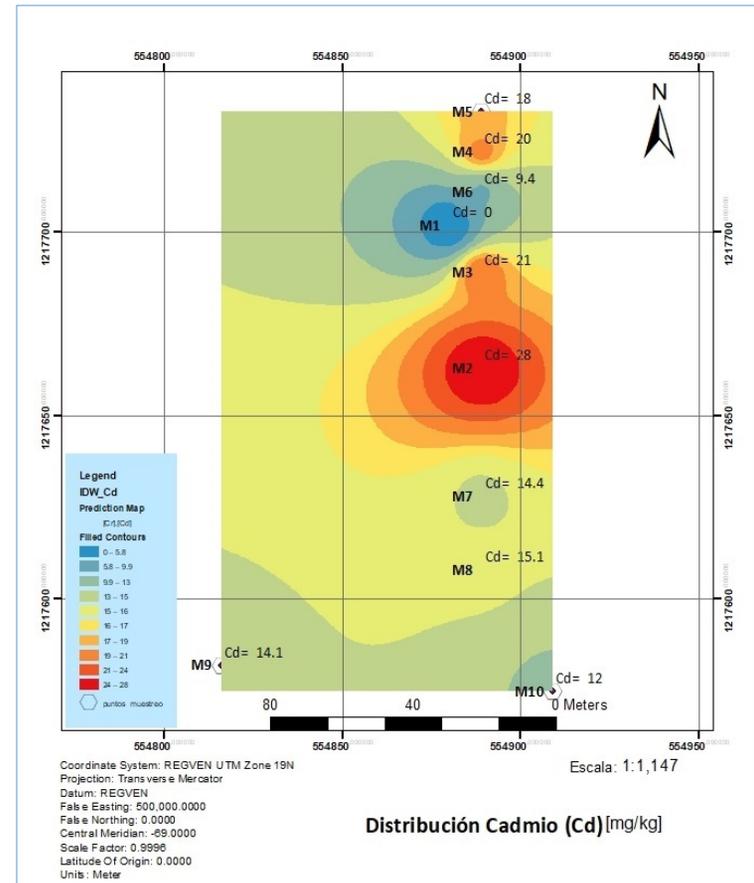


Figura 4.18 Mapa de distribución de cadmio, utilizando interpolación IDW

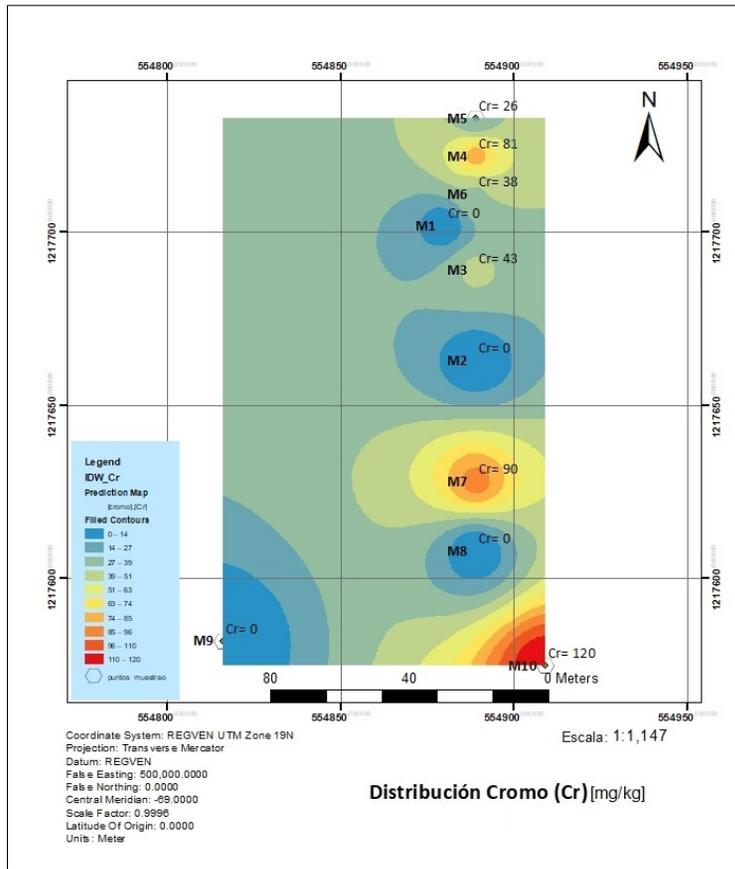


Figura 4.19 Mapa de distribución de cromo, utilizando interpolación IDW

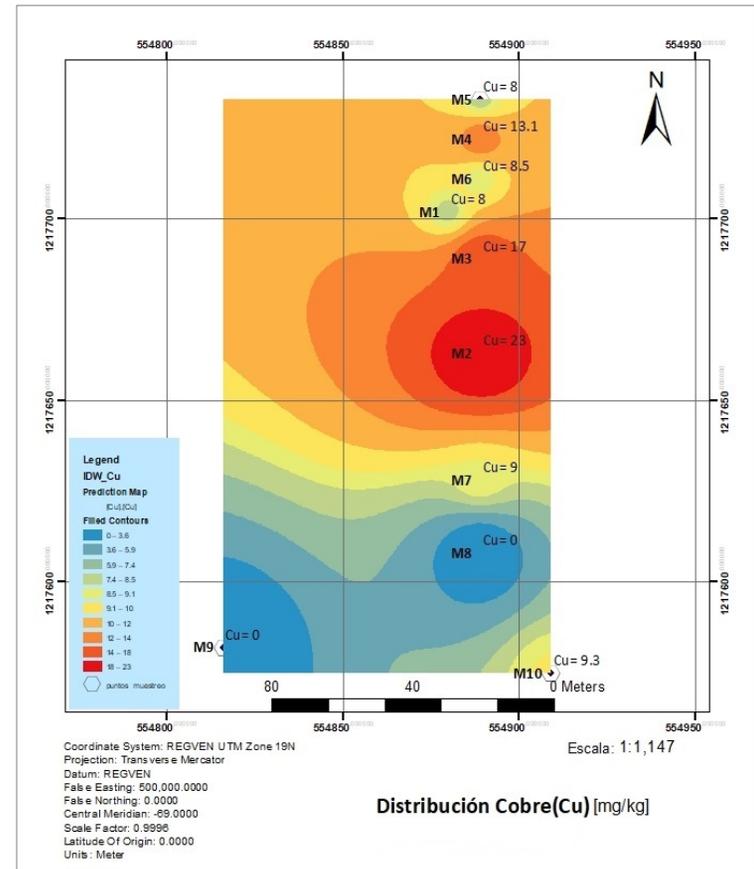


Figura 4.20 Mapa de interpolación de cobre, utilizando interpolación IDW

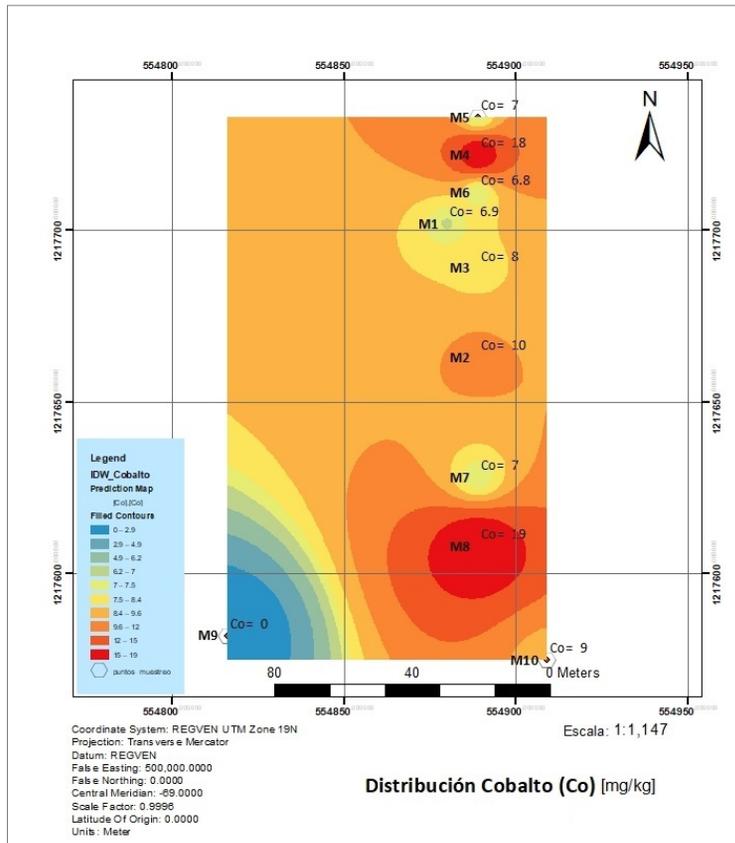


Figura 4.21 Mapa de distribución de cobalto, utilizando interpolación IDW

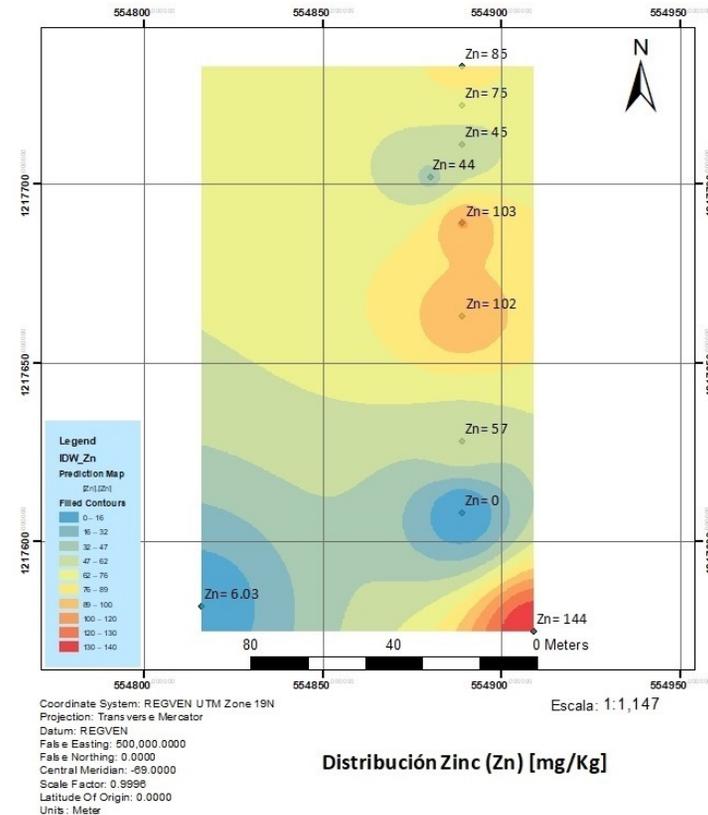


Figura 4.22 Mapa de distribución de zinc, utilizando interpolación IDW

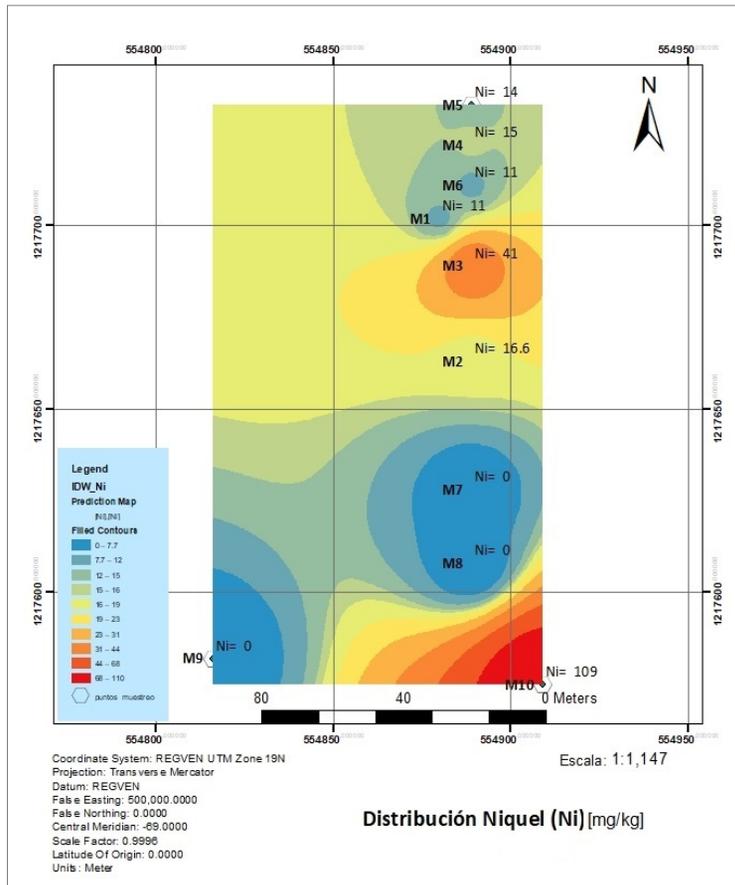


Figura 4.23 Mapa de distribución de níquel, utilizando interpolación IDW

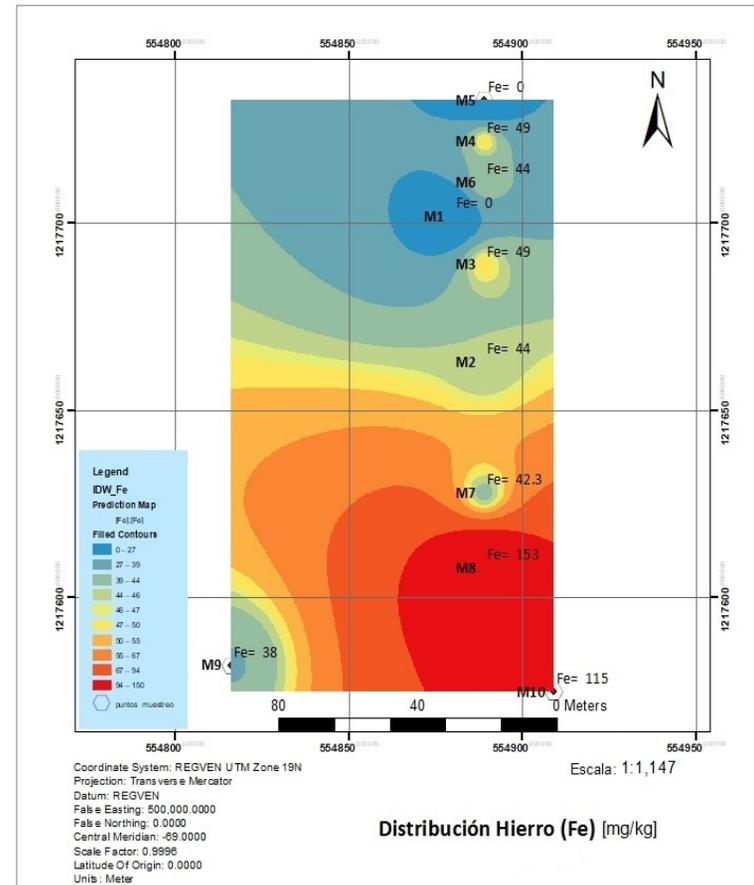


Figura 4.24 Mapa de distribución de hierro, utilizando interpolación IDW

4.5 Propuesta metodológica

Finalmente, se presenta la propuesta para el procedimiento metodológico. El mismo se puede utilizar para la generación de mapas para mostrar la distribución de contaminación para aplicar técnicas de biorremediación o como parte de la ejecución de otro tipo de estudio o evaluación ambiental.

CAPÍTULO 5

PROPUESTA METODOLÓGICA

REPRESENTACIÓN DE CONTAMINACIÓN EN SUELOS IMPACTADOS CON HIDROCARBUROS DE PETRÓLEO UTILIZANDO ANÁLISIS ESPA- CIAL Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

5.1 OBJETIVO

Presentar el procedimiento metodológico para la representación de la distribución de la contaminación en suelos impactados por hidrocarburos de petróleo, utilizando análisis espacial y sistemas de información geográfica.

5.2 ALCANCE

Aplica para la elaboración de mapas de distribución de contaminación en suelos impactados con hidrocarburos de petróleo con fines investigativos, para la aplicación de técnicas de saneamiento o para cualquier aplicación donde se requiera la elaboración de mapas de distribución de contaminación.

5.3 ETAPAS DEL PROCESO

Se debe cumplir con una serie de pasos de manera coordinada para garantizar la calidad y efectividad en el proceso. La elaboración de un plan de trabajo coordinado es fundamental para cumplir con cada una de las etapas que se presentan a continuación.

En la figura 5.1, se muestra un diagrama de flujo del proceso. Algunos de los procedimientos requeridos ya fueron explicados en detalle en el capítulo 3, en cuyo caso solo se hará la referencia a la sección en la cual se puede encontrar dicho procedimiento.

5.3.1 Identificación de la zona de interés

Para determinar el impacto de un contaminante en el suelo, es indispensable recabar información del área a ser evaluada y obtener todos los datos y análisis tanto de las características físico-químicas de los suelos, así como de todas las actividades antrópicas que puedan haber generado la contaminación. Recabar datos históricos es importante para conocer los orígenes reales de los daños que se han ocasionado al ambiente.

5.3.2 Inspección Preliminar

Se debe recopilar información sobre:

- a) Las características y condiciones del sitio objeto del estudio.
- b) Ubicación geográfica y los límites del área analizada.
- c) Clima, demografía, geología e hidrología.
- d) Especificación de uso de la tierra.
- e) Topografía del terreno.
- f) Historia de actividades comerciales, industriales u otras posibles desarrolladas en el área.
- g) Identificar las posibles fuentes de contaminación.

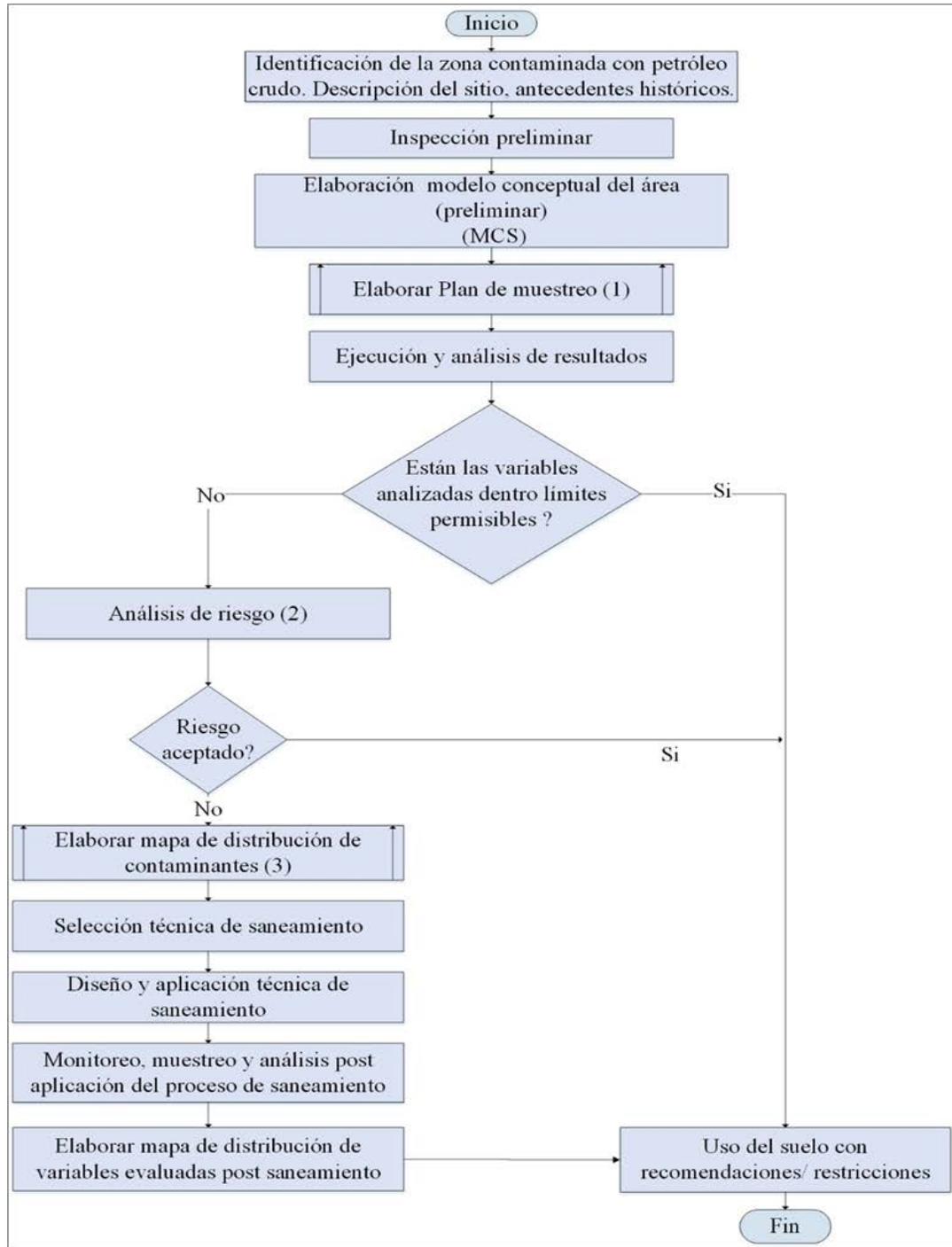


Figura 5.1 Diagrama de flujo general del proceso metodológico

5.3.3 Elaborar el modelo conceptual del sitio contaminado (MCS)

En la sección 3.2.1.1 del capítulo 3, se introdujo el concepto de modelo conceptual del área y su importancia para el plan de muestreo y el análisis de riesgo. Allí se detallaron las etapas que se debe cumplir, las cuales se resumen a continuación:

- a) Definición del sitio y recopilación de toda la información histórica.
- b) Determinar las fuentes de contaminación y contaminantes potencialmente peligrosos.
- c) Identificación de posibles receptores sensibles de los efectos de la contaminación.
- d) Identificar las posibles vías mediante las cuales los contaminantes pueden liberarse en el ambiente.
- e) Elaborar el instrumento gráfico que representa el modelo. Ver ejemplo en la figura 5.2, capítulo 4, modelo conceptual del sitio.

5.3.4 Elaborar el plan de muestreo.

El muestreo es la etapa más importante en el estudio de los suelos. El objetivo de la elaboración de un plan de muestreo es coordinar las tareas que se desarrollaran en el campo para garantizar la efectividad y calidad del trabajo y gestionar los recursos requeridos. En la figura 5.2, se presenta el diagrama de flujo del proceso de elaboración de un plan de muestreo el cual está conformado por las siguientes etapas:

- a) Definición de los objetivos del muestreo. Ver sección 3.2.1.3.1, capítulo 3.
- b) Seleccionar el sistema de georreferenciación y dispositivo geoposicionador a utilizar.
- c) Seleccionar la cartografía del área y determinar la ruta de acceso.
- d) Definir la estrategia de muestreos, determinando:
 - ✓ El esquemas de muestreo. Ver sección 3.2.1.3.3(a).

- ✓ El tipo de muestreo. Ver sección 3.2.1.3.3(b).
 - ✓ El número de muestras. Ver sección 3.2.1.3.3 (c).
 - ✓ La profundidad de muestreo. Ver sección 3.2.1.3.3(d).
 - ✓ Tipos de muestras a recolectar. Ver sección 3.2.1.3.3(e).
 - ✓ La técnicas de muestreo y las herramientas a utilizar. Ver sección 3.2.1.3.3(f).
- e) Planificar las actividades a ejecutar en el campo
- ✓ Definir responsabilidades.
 - ✓ Elaborar un cronograma de trabajo.
 - ✓ Definir procedimientos e instructivos de trabajo, incluyendo aquellos para: la identificación, registro, almacenamiento, custodia y transporte de las muestras hasta el laboratorio de análisis
 - ✓ Definir procedimientos de seguridad.
- f) Análisis de los resultados.
- g) Elaborar informe final del procedimiento.

5.3.5 Ejecutar el muestreo de acuerdo al plan formulado y análisis de resultados.

Ejecutado el muestreo de acuerdo a lo planificado, se pasa a la etapa de revisión y análisis de resultados. Las actividades a desarrollar en este caso son las siguientes:

- a) Seleccionar la aplicación de software SIG a utilizar.
- b) Elaborar el análisis estadístico de los datos: media, varianza, desviación estándar, histograma de frecuencias, análisis de normalidad, valores atípicos, tendencias significativas y correlación entre variables para elaborar inferencias estadísticas sobre las variables de interés.

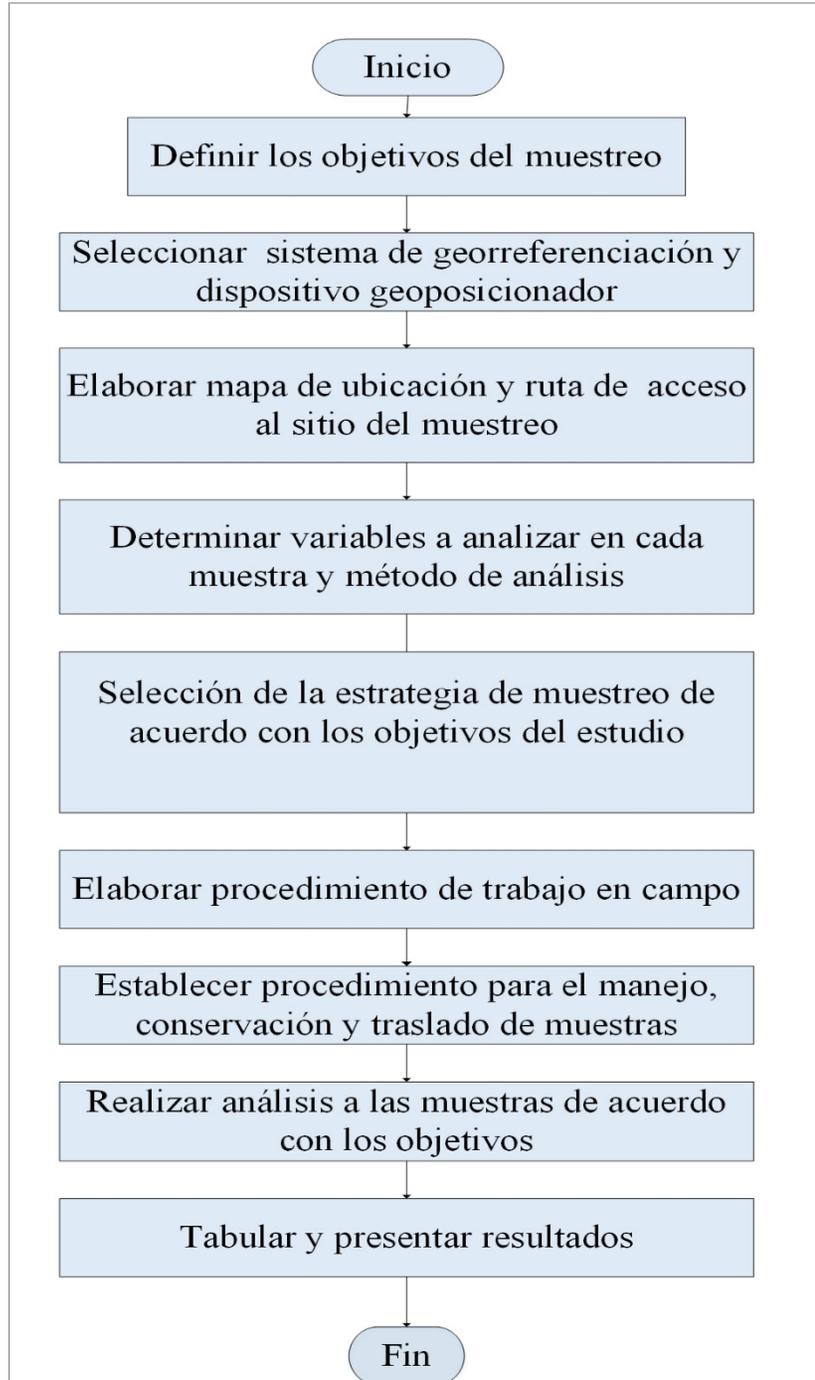


Figura 5.2 Diagrama de flujo del procedimiento para la elaboración del plan de muestreo

Nota: Adaptado de ISO 10381-1:2002

- c) Elaborar mapa de ubicación de los puntos en el espacio con sus respectivas coordenadas UTM, con el valor obtenido del muestreo de cada una de las variables.
- d) Para cada variable comparar los valores obtenidos con los límites de tolerancia y determinar si se encuentra dentro de los límites de operación. Elaborar conclusiones sobre los resultados de esta etapa, para determinar la criticidad de la situación y verificar la toma de acciones basadas en estos resultados. Valores dentro de las normas para la variable de interés, podrían motivar el uso del terreno con algunas actividades previas y/o restricciones. En caso de desviaciones de las normativas aplicadas se debe continuar con el análisis del caso.

5.3.6 Elaborar análisis de riesgo.

En el análisis de riesgo se debe determinar la factibilidad de usar el suelo con los valores de calidad reportados y las restricciones que se deben aplicar según el caso. En el capítulo 2 sección 2.2.6 y en el capítulo 3, sección 3.2.2a, se explica en detalle la metodología para el análisis y la evaluación de riesgos.

5.3.7 Elaborar el mapa de distribución de contaminantes.

En la figura 5.3, se presenta el diagrama de flujo del proceso para la elaboración del mapa de distribución de contaminantes. Siguiendo el mismo, las actividades que se deben cumplir son las siguientes:

5.3.7.1 Realizar análisis de los datos.

Ya sea que provenga como resultado del muestreo o provenga de otra fuente primaria, se debe realizar un análisis de la data para detectar puntos de interés. El número de muestras, las tendencias y sus valores atípicos, son puntos importantes a detectar y analizar al momento de realizar el procedimiento. Esto permitirá además seleccionar el interpolador que más se adapta a las exigencias.

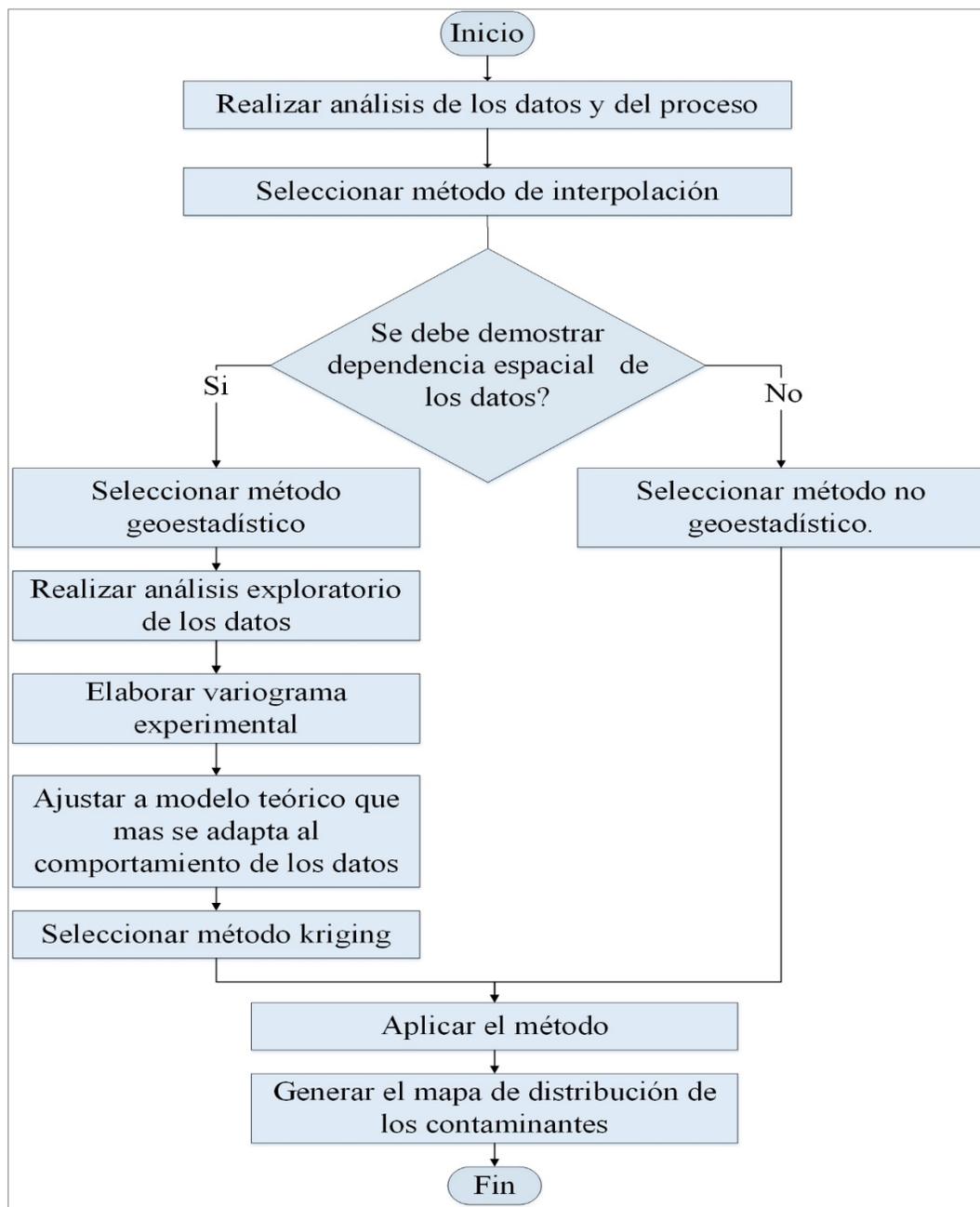


Figura 5.3 Diagrama de flujo del proceso de elaboración del mapa de distribución de contaminantes

5.3.7.2 Seleccionar el método de interpolación a utilizar.

Considerar los árboles de decisión presentados en las figuras 3.4 y 3.5 (capítulo 3). Los interpoladores más usados comúnmente son IDW y el kriging en sus diferentes modalidades. En la tabla 3.12 y 3.13 (capítulo 3), se presenta un resumen con los detalles más significativos de los diferentes métodos, para ofrecer las opciones disponibles. La selección del método la debe realizar el investigador de acuerdo con las características de su proyecto, tomando las referencias dadas en este procedimiento. En el anexo C, se presenta un resumen del funcionamiento de la herramienta IDW del ArcGis de ESRI®, que proporciona información valiosa sobre el funcionamiento de la misma, independiente del software GIS utilizado.

La selección de la aplicación de un método geoestadístico (kriging), conlleva a la ejecución del análisis de los datos para comprobar la dependencia espacial de la variable en estudio. Para realizar este análisis que se denomina análisis estructural, se debe elaborar el semivariograma experimental para determinar el comportamiento de la variable y determinar si hay dependencia espacial de los datos, luego se debe ajustar este a un modelo teórico, que permitirá definir una fórmula matemática a la cual se le aplicará el modelo geoestadístico de interpolación.

5.3.7.3 Demostrar la dependencia espacial de los datos

Esta etapa se debe cumplir al seleccionar un método geoestadísticos, si este no es el caso pasar directamente a la etapa 5.4.7.4.

Este procedimiento aplica para los resultados de una variable medida en un número N de muestras provenientes de igual número de puntos de muestreo ($N \geq 30$) del área de interés. Para ello el procedimiento es el siguiente:

- a) Realizar el mapa de ubicación de los puntos de muestreos de acuerdo a sus coordenadas UTM o geográficas. Ver figura 5.4.

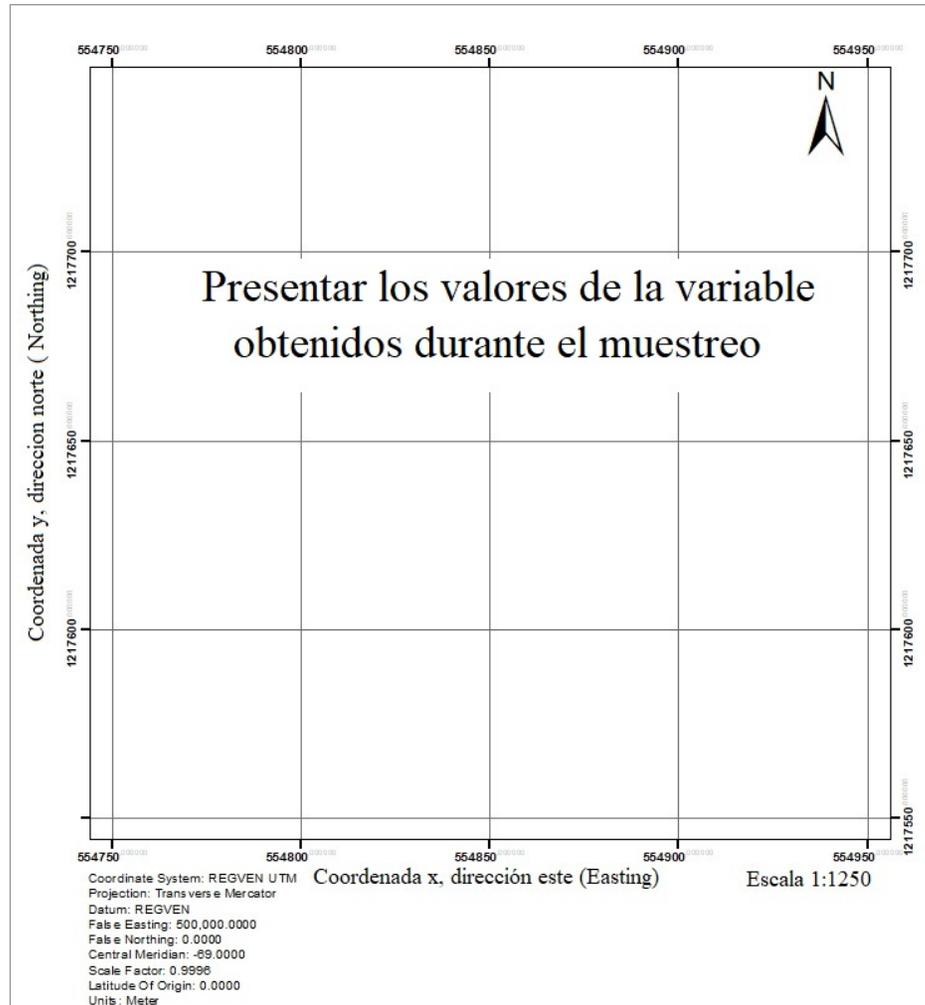


Figura 5.4 Modelo para la presentación del mapa de coordenadas de los puntos de muestreo

- b) Determinar todos los estadísticos de las variables: media, mediana, moda, valores atípicos y construir el histograma de frecuencias y evaluar la normalidad de los datos.

- c) Determinar las correlaciones entre las variables analizadas, para evaluar la influencia de las relaciones entre ellas.
- d) Para determinar la dependencia espacial se deben elaborar gráficos de dispersión, donde los pares de datos representan medidas de la misma variable separadas una distancia “ h ” una de otra. Esta separación es denominada como “lag” (lapso). Para construir el gráfico, se coloca en el eje “X” la variable principal y en el eje “Y” la variable desplazada (lagged).

e) Se define lo siguiente:

x : vector de coordenadas espaciales de cada punto.

$Z(x)$: la variable considerada en el punto de coordenadas x .

h : vector de desfase representando la distancia de separación entre dos ubicaciones en el espacio.

$Z(x+h)$: versión desfasada de la variable en consideración.

$N(h)$: representa el número de pares separados la distancia h .

El valor $Z(x)$ se denomina “cola” (*tail*) y el valor $Z(x+h)$ se denomina “cabeza” (*head*), por considerarse que representan la “cabeza” y la “cola” del vector de separación “ h ”.

- f) Se deben realizar los diagramas de dispersión- h para diferentes distancias de separación ($h, 2h, 3h \dots nh$). La “ h ” máxima, debe ser menor que la distancia máxima entre dos puntos del juego de datos. Se debe obtener suficientes pares de datos para cada diagrama de dispersión, recomendando al menos 10 pares de datos por cada distancia evaluada. Por ello, si no se cuenta con suficientes pares de datos separados la distancia “ h ” exacta seleccionada, se debe utilizar tolerancias. Esto implicaría que las distancias de separación serían “ $h \pm$ la tolerancia”. Por ejemplo, si se ha seleccionado una distancia h igual a 100 metros

y no se cuenta con un número suficiente de pares de datos separados esa distancia, se puede utilizar 100 ± 50 m, con lo cual se tomarían todos los pares de datos separados una distancia desde 50 hasta 150 metros. Con estos diagramas de dispersión se puede determinar si existe correlación entre los pares de datos separados las diferentes distancias de $h \pm$ tolerancia.

- g) Se realizan los diagramas de dispersión para cada caso, para determinar cómo es la correlación de los datos. La semivarianza es la dispersión de los datos sobre la recta de 45 grados en el gráfico, (Ver figura 5.5). Se pueden realizar los diagramas de dispersión para las distancias h , $2h$, $3h$ con las respectivas tolerancias y calcular las correlaciones, covarianzas y semivarianzas para definir la relación espacial entre las mediciones.

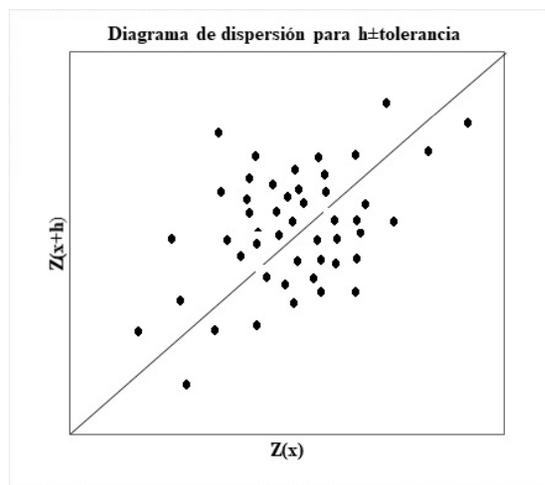


Figura 5.5 Ejemplo gráfico de dispersión para una h

Para esta metodología se trabajará con la semivarianza. Esta representa la disimilitud entre las observaciones, con lo cual a medida que esta aumenta, más difieren los pares de datos.

Para elaborar el semivariograma experimental con los datos calculados se utiliza la fórmula:

$$\text{Semivarianza: } \hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i + h) - z(x_i)]^2$$

- h) Se debe calcular el semivariograma experimental para diferentes distancias h . La recomendación es hacerlo a separaciones y distancias iguales. En la figura 5.6, se muestra un ejemplo de la elaboración del semivariograma experimental.

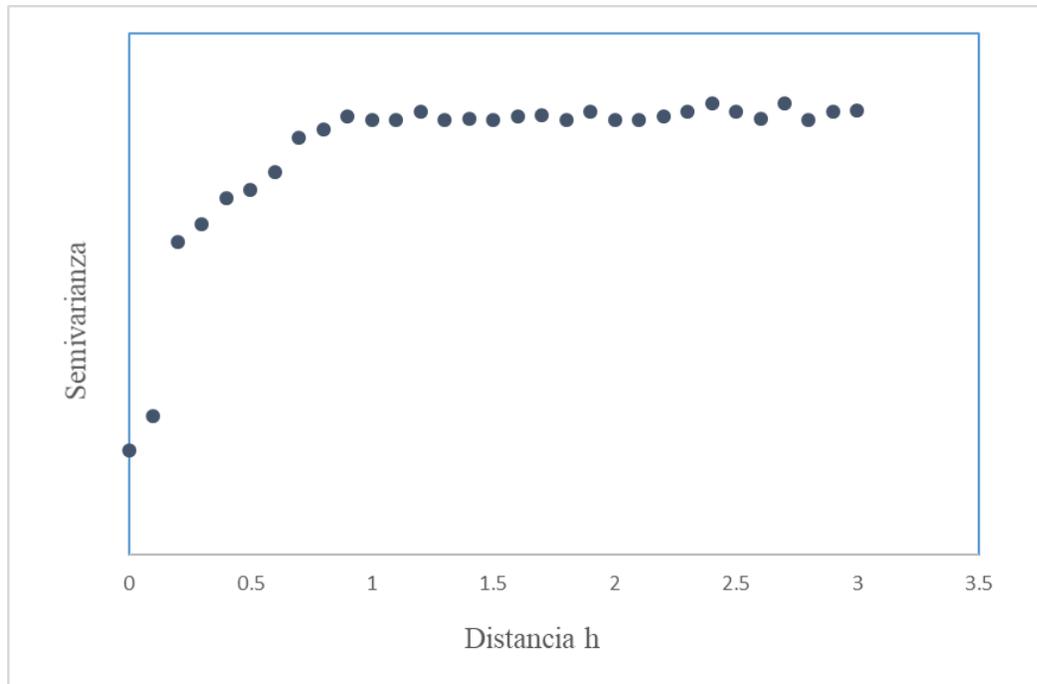


Figura 5.6 Ejemplo de semivariograma experimental

El gráfico mostrado, representa el comportamiento de una variable regionalizada, en el cual la varianza es pequeña en distancias cortas y aumenta a medida que la distancia aumenta, hasta un momento en que se mantiene casi constante. En

este caso se comprueba la dependencia espacial de las variables y se puede utilizar un método geoestadístico.

El semivariograma experimental, no puede utilizarse directamente porque está sujeto a los errores del muestreo, de las aproximaciones, las tolerancias de los lags y al número limitado de datos. Por ello, se debe utilizar un semivariograma teórico que se haya ajustado con el semivariograma experimental. El ajuste también permite obtener una fórmula, que será usada en los cálculos. Las aplicaciones de software de sistemas de información geográfico trabajan con el semivariograma teórico y su ecuación.

Para ajustar un semivariograma experimental al teórico se debe realizar un análisis de la gráfica para identificar el rango, la meseta o el efecto pepita, para poder ejecutar el mejor ajuste a un modelo teórico. (Ver sección 2.2.14.6 capítulo 2 y modelos de semivariograma figura 3.6 capítulo 3). Las fórmulas están representadas en las ecuaciones 3.16 a la 3.21, presentadas en el capítulo 3. Para el ejemplo mostrado en la figura 5.6, se presenta a continuación, en la figura 5.7, los parámetros para definir el semivariograma teórico. Para ese ejemplo el modelo correspondería con un modelo esférico con fórmula del tipo:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] \text{ para } h \leq a$$

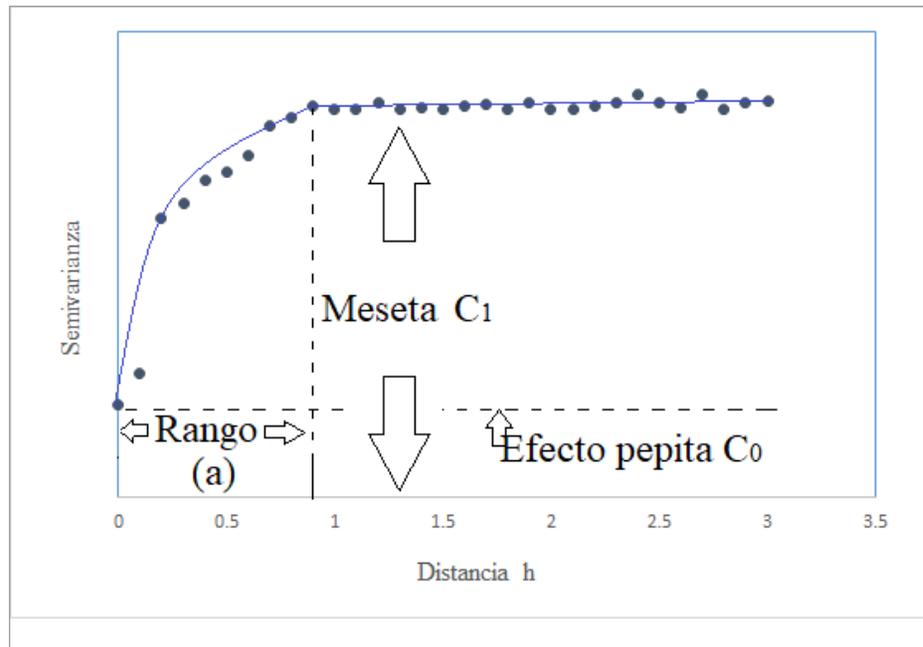


Figura 5.7 Ejemplo ajuste del semivariograma experimental

5.3.7.4 Aplicar el método de interpolación espacial seleccionado y generar los mapas de distribución de contaminantes.

Una vez determinada la ecuación matemática que mejor se ajusta con el semivariograma experimental, se aplica el método seleccionado. Cada software GIS aporta la descripción y detalles de los parámetros de cada método en sus secciones de “ayuda”. Las salidas de dicho procedimiento deben proporcionar una superficie “ráster”, con los diferentes rangos de valores de las variables analizadas. La presentación final y los acabados de los mapas con las variaciones de las variables en la superficie, se definen con las facilidades gráficas de la aplicación utilizada. Con los mapas resultantes se deben realizar los análisis y elaborar las conclusiones, generando las estrategias requeridas de acuerdo con los objetivos de la investigación.

5.3.8 Seleccionar la técnica de saneamiento.

Cuando el objetivo es el saneamiento, en esta etapa se debe seleccionar el método de saneamiento a aplicar de acuerdo con los objetivos de la investigación.

5.3.9 Diseño aplicación de la técnica de saneamiento, muestreo, análisis y elaboración del mapa post-saneamiento.

Medir la eficiencia de la solución, es un paso requerido al aplicar el saneamiento. Para ello se debe realizar un muestreo de verificación. Con los resultados de este, se seguirán los pasos para la elaboración del mapa con los resultados finales.

5.3.10 Recomendaciones finales para el uso del suelo

De los resultados de la técnica aplicada, se determinará la calidad resultante del suelo y las recomendaciones para su uso, así como las restricciones que aplican según cada caso analizado.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

Las actividades realizadas en la presente investigación, demostraron que la elaboración de mapas de distribución de contaminantes en sitios impactados por hidrocarburos de petróleo, requiere del cumplimiento de una serie de etapas, cuya efectividad está ligada a la adecuada planificación y control de cada una de ellas y la conjunción de una serie de disciplinas que incluyen: la cartografía, la geodesia, la geografía, la química, la estadística, la geoestadística. El inicio de todo el proceso está determinado por el procedimiento de muestreo, el cual permite la determinación de las características físicas y químicas del área en estudio.

La selección del esquema de muestreo y la calidad en la ejecución del mismo, influye en el número y ubicación geográfica de las muestras para el adecuado mapeo del área. El número y calidad de las observaciones brinda más opciones para la precisión de las herramientas de predicción.

La cartografía y la geodesia, son herramientas importantes en el avance de las estrategias de saneamiento ambiental, porque aportan el conocimiento de la superficie terrestre necesaria para ubicar los resultados de estudios de suelos en el espacio geográfico; y utilizar todas las herramientas tecnológicas avanzadas de computación, para la geolocalización de todos esos resultados y el uso de técnicas avanzadas de análisis espacial.

Los sistemas de información geográfica son herramientas muy poderosas para el análisis de problemas medioambientales porque permiten optimizar los recursos disponibles al suministrar herramientas para almacenar, analizar, estimar y graficar datos y

poder generar información en forma estructurada, de manera rápida y eficiente. La cantidad de herramientas disponibles y la velocidad para el procesamiento de datos, brinda al investigador efectividad en el procesamiento de información y rapidez en la difusión de las conclusiones alcanzadas.

El proceso de análisis de riesgo como parte de todo estudio ambiental y la elaboración de un modelo conceptual del área contaminada, ayuda a dimensionar adecuadamente el plan de muestreo, debido a que indica la intensidad del mismo, de acuerdo con la identificación de los medios y receptores potencialmente impactados por los efectos de la contaminación.

En el caso de estudio utilizado para validar las etapas del procedimiento metodológico, se comprobó que la variable físico-química que presentó mayor impacto en la zona por efecto de la contaminación por TPH, fue la retención de humedad. No se pudo determinar impactos concluyentes en otras variables. Para este caso, dado el número de muestras ($N = 10$), se utilizó el método de interpolación por distancias inversas (IDW), observándose el efecto denominado “ojo de buey”, el cual es un área circular alrededor de la variable medida, originado por la influencia espacial de esa muestra. Este patrón demuestra la relación espacial que se asume al utilizar el método no geoestadístico. Al evaluar el riesgo de que el receptor humano pueda contraer cáncer, por ingestión accidental y por contacto dérmico para el caso del TPH, este se encontró por encima de lo “aceptable”, (1×10^5). Para el resto de los casos de este y todos los demás compuestos, no se reportaron valores fuera del límite.

La selección del método adecuado de interpolación está determinada por los requerimientos y estrategias formuladas por el investigador. Al realizar el planeamiento del muestreo se debe considerar la cantidad de datos requeridos para obtener una muestra representativa que permita inferir con el menor nivel de incertidumbre las variables necesarias para generar información útil y confiable para la toma de decisiones. Se debe

lograr preferiblemente, un número de muestras mayor de treinta ($N > 30$), para contar con más opciones para análisis estadísticos y geoestadísticos de las variables en estudio.

RECOMENDACIONES

1. Desarrollar propuestas para el sellado o redireccionamiento para el confinamiento o uso, de las emanaciones de petróleo crudo de las perforaciones abandonadas de la zona del Mene de San Lorenzo en Yaracal, estado Falcón.
2. Elaborar un estudio actualizado con un muestreo más exhaustivo del área que permita lograr una mayor cantidad de muestras representativas en diferentes direcciones que permita evaluar la situación actual.
3. Recabar más información sobre los efectos a la población de la zona y a los factores ecológicos, de estos derrames permanente de petróleo crudo, realizando encuestas en la población del área.
4. Elaborar un estudio que permita determinar el punto óptimo de costos para la selección entre: un método geoestadístico para interpolar la superficie en estudio o la ejecución de un plan de muestreo más intensivo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arias, F. (1999). *El Proyecto de investigación: Guías para su elaboración*. Caracas, Venezuela.
- Agency for toxic substances and disease registry. *ATDSR Toxicological profiles. Toxic Substances portal*. Descargado de: <https://www.atdsr.cdc.gov/toxprofiles/tp.asp?id=424&tid=75>.
- American Psychological Association (2013). *Publication Manual of the American Psychological Association*. Sixth edition. Washington, DC: Autor.
- Anacona, C. y Rhim, A. (2004). *Riesgos ambientales asociados a sitios contaminados*. Informe final de proyecto de asesoría técnica. Santiago de Chile.
- Armado, A. y Noguera, S. (2010). *Evaluación de metales en suelos contaminados por derrames de crudo en Yaracal, estado Falcón, Venezuela*. Trabajo especial de grado. Facultad de Ciencias y Tecnología. Universidad de Carabobo. Valencia, Venezuela.
- Barrios, L. y Polychroniadis, L. (2006). *Evaluación del proceso de biorremediación de un suelo en la degradación de hidrocarburos saturados y aromáticos empleando bioestimulación*. Trabajo especial de grado. Facultad de Ingeniería. Universidad de Carabobo. Valencia. Venezuela.
- Bocco, G.; Mendoza, M.; Priego, A. y Burgos, A. (2009). *La cartografía de los sistemas naturales como base geográfica para la planeación territorial*. Primera edición. México.
- Bohling, G. (2005). *Introduction to Geoestatistic and variogram analysis*. Kansas Geological Survey.
- Burrougs, P. y Mcdonald, R. (1998). *Principles of geographical information sytems*. Oxford University press. (pp. 17-34). Descargado de: <http://dds.cepal.org>.
- Chappin, R.; McGroddy, S y Kile, D. (1998). *Química*. Publicaciones cultural México
- Cresse, N. (1993). *Statistical for Spatial analysis*. Iowa State University. Revised edition. U.S of América.
- Corbett, J. and Keogh, R. (2012). *Developing a comprehensive conceptual site model: Getting the most out of your site history*. Publication Remediation Australasia Adelaide. Australia [Documento en línea]. Disponible http://epa.tas.gov.au/documents/creating%20a%20conceptual%20site%20model_article%20by%20parsons%20brinckerhoff.pdf
- Corrales, G. y Guanipa, D. (2016) *Propuestas de técnica de biorremediación para un suelo contaminado con hidrocarburos en la zona del Mene de San Lorenzo en Yaracal, estado Falcón*. Trabajo especial de grado. Facultad de Ingeniería. Universidad de Carabobo. Valencia. Venezuela.

- Departamento de Salud y servicios humanos de los EE.UU. (1999). *Hidrocarburos totales de petróleo*. División de toxicología y medicina ambiental. Descargado de: www.atsdr.cdc.gov/es.
- Díaz, J. (2012). *Comparación entre árboles de regresión CART y regresión lineal*. Escuela de estadísticas Universidad Nacional de Colombia. Medellín.
- Fernández, I. (2001). *Las coordenadas geográficas y la proyección UTM (Universal Transversa de Mercator) El Datum*. Universidad de Valladolid. España.
- Fernández, C.; Llóbregat, M.; Jiménez, B.; Altomare, V. y Labrador, H. (2008). *Biodegradación de asfáltenos y resinas por microorganismos presentes en suelos contaminados por hidrocarburos*. Artículo de investigación científica. Revista de la Facultad de Ingeniería v.23 n.4. Universidad Central de Venezuela.
- García, W.; Luizaga, C. y Herbas, E. (2016). *Análisis de riesgo ambiental producto de pasivos ambientales de YPF, generados en la limpieza de contenedores en inmediaciones de la refinería Gualberto Villaroel (Cochabamba-Bolivia) y propuesta de medidas correctivas. Bolivia*.
- García, M.; Landaeta, M.; Baptista, G.; Murillo, C.; Rincón, M.; Rached, L.; Bilbao, A.; Anderson, H.; García, D.; Franquiz, J.; Puche, R.; García, O.; Quintero, Y.; Peña, J. (2013). *Valores de referencia de hierro, yodo, zinc, selenio, cobre, molibdeno, vitamina C, vitamina E, vitamina K, carotenoides y polifenoles para la población*. Instituto Venezolano de investigaciones científicas, Fundación Bengoa, Universidad Central de Venezuela, ILSI Norandino, Universidad del Zulia, Industrias Parmalat, Universidad de los Andes, Organización Mundial de la Salud. Caracas. Venezuela.
- Giraldo, R. (n.d). *Introducción a la Geoestadística*. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. Descargado de: ftp://ftp.ciat.cgiar.org/dapa/projects/cursostalleres/curso_r/documentos/librodegeoestadistica.pdf.
- Gómez, D. (2004). *Evaluación de Impacto Ambiental*. Segunda Edición. Editorial Agrícola Española S.A. Madrid.
- Glynn, J. y Heinke, G. (1999). *Ingeniería Ambiental*. Segunda Edición. México.
- Henríquez, M. y Vilorio, J. (1999). *Número de observaciones para obtener semivariogramas de algunas propiedades de suelos y distancias de muestreo. Trabajo de investigación*. [Documento en línea]. Disponible en: http://sian.gob.ve/repositoria/revistas_ci/Agronomia%20Tropical/at4901/art/henriquez_m.htm.
- Hernández, Fernández y Baptista (1995). *Metodología de Investigación*. Primera Edición. Traducción H. Escalona Mac Graw Hill. México.
- Isaaks, E. and Srivastava, R. (1989). *Applied Geostatistics*. Oxford University press. New York.

- Jekeli, C. (2006). *Geometric reference systems in Geodesy*. Ohio State University Institution USA.
- Kiely, G. (1999). *Ingeniería Ambiental*, Vol. III. Mac Graw Hill. España.
- Li, J. And Heap, A. (2008). *A review of Spatial Interpolation Methods for Environmental Scientist*. Geoscience Australia, Record 2008/23 (pp. 137).
- Martin, A. (2010). *Sistema marco de referencia terrestre. Sistemas de coordenadas*. Departamento de cartografía, geodesia y fotogrametría. Universidad Politécnica de Valencia. España. Descargado de:
<http://www.upv.es/unigeo/index/docencia/etsigct/astrologia/teoria/astrologia210.pdf>.
- Martínez, L. (1998). *Muestreo de áreas: Diseño de muestras y estimación de pequeñas áreas*. Universidad Politécnica de Madrid. España. (pp.2-1).
- Melo, C. (2012). *Análisis geoestadístico espacio tiempo basado en distancias y splines con aplicación*. Universidad de Barcelona, Barcelona España.
- Mendenhall, W.; Beaver, R. Y Beaver, B. (2010). *Introducción a la probabilidad y estadística*. Traducción J. Romo. Ed. Cengage Learning Editores S.A. México.
- Méndez, M.; Rennola, L.; Peña, M. y Rodríguez P. (2011). *Determinación de hidrocarburos totales de petróleo (TPH) usando CG-FID en suelos de un patio de tanques en desuso situado en Catia La Mar –Venezuela*. Universidad de los Andes. Mérida, Venezuela.
- Meyer, P. (1973). *Probabilidad y aplicaciones estadísticas*. Dpto. matemáticas Universidad de Washington. EUA.
- Ming Y. (2010). *A study on determining the sample size in Geostatistics*. University of Alberta. Canadá.
- Ministerio del Ambiente Perú. (2014). *Guía para el muestreo de suelos*. Dirección general de calidad ambiental. Lima.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2007). *Manual técnico para la ejecución de análisis de riesgo para sitios de distribución de derivados del petróleo*. Bogotá, Colombia.
- Montoya, C.; Loaiza, D.; Cruz, C.; Torres, P.; Escobar, J. y Delgado, L. (2009). *Propuesta metodológica para localización de estaciones de monitoreo de calidad de agua en redes de distribución utilizando sistemas de información geográfica*. Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente, Universidad del Valle, Colombia.
- Normas para el control de la recuperación de materiales peligrosos y el manejo de desechos peligrosos (Decreto 2635) (1998). Gaceta Oficial De La República Bolivariana De Venezuela. (Extraordinario), agosto 3,1998.

- Olaya, V. (2014). *Sistemas de información geográfica*. Edición web.
- Orlínz, O.; Tse, I y Gavilán A. (2003). *La restauración de suelos contaminados con hidrocarburos en México*. Gaceta ecológica No.69. Oct-dic 2003 pp. 83-92. Secretaria Medio Ambiente.
- Oropeza, J. (2010). *Diversidad microbológica de bacterias y hongos en suelos impactados con petróleo, provenientes de Yaracal, estado Falcón Venezuela*. (pp. 21- Facultad de Ciencia y Tecnología Universidad de Carabobo Institución. Venezuela.
- Paredes, C.; Salinas, W.; Martínez, X. y Jiménez, S. (2012). *Evaluación y comparación de métodos de interpolación determinísticos y probabilísticos para la generación de modelos digitales de elevación*. Facultad de Ingeniería y Ciencias Universidad Autónoma de Tamaulipas. México.
- Pérez, V. (2009). *Estudio de la formulación de sistemas surfactante-aceite-agua como alternativa en la remediación de suelos contaminados con crudo liviano de Yaracal, estado Falcón*. Facultad de ciencias y tecnología. Universidad de Carabobo. Venezuela.
- Petro, C. y Mercado, G. (2014). *Biorremediación de suelos contaminados por derrames de hidrocarburos derivados del petróleo en Colombia*. Universidad de San Buenaventura seccional Cartagena. Edición. Colombia.
- Polo, M. y Martínez, Y. (2010). Modelo conceptual de un suelo potencialmente contaminado con desechos de una industria papelera. Universidad de Carabobo. Venezuela.
- Ramírez, B.; Ramírez, G.; Estrella, N. Y Ruiz, A. (2003). *Análisis del uso estadístico en suelos contaminados por hidrocarburos: experiencia en el estado de Veracruz*. Descargado de: http://web.uaemex.mx/Red_Ambientales/docs/memorias/extenso/CA/EO/CAO-04.pdf.
- Rodríguez, J. (2014). *Aplicación de métodos de interpolación para el cálculo de precipitación por modelamiento geoestadístico y análisis espacial para el departamento de Cundinamarca*. [http://repository.unimilitar.edu.co/trabajo de grado](http://repository.unimilitar.edu.co/trabajo_de_grado).
- Ruiz, D. (2004). *Manual de estadística*. Editado eumed.net. Sevilla, España.
- Sabino, C. (1989). *El proceso de Investigación Científica*. Editorial LUMEN Humanitas. Buenos Aires.
- Sadzawka, R. y Campillo, R. (1999). *Acidificación de los suelos y los procesos involucrados*. Instituto de investigación agropecuaria. Osorno, Chile.
- Soil Science Society of América (2008). *Glossary of Soil Science term*. Wiscosin, USA.
- Solana, A. (2009). *La Biodegradación de Hidrocarburos y su Aplicación en la Biorremediación de Suelos*. Universidad de Barcelona, España.

- Spiegel, M. (1969). *Estadística*. Quinta edición. McGraw-Hill. Colombia.
- State of Ohio Environmental Protection Agency (Rev.2008). *Guidance for Conducting Ecological Risk Assessments*. Columbus, Ohio.
- Tamayo, M. (1996). *El Proceso de la Investigación Científica*. Tercera Edición. Editorial Limusa. México. 231 p.p.
- Umwelt Probenbank Desbundes (2012). *Guideline for Sampling and Sample Treatment Soil*. (Guía para el muestreo y tratamiento de las muestras de suelos). Descargado de: https://www.umweltprobenbank.de/upb_static/fck/download/SOP_Soil.pdf.
- Universidad Pedagógica Experimental Libertador (2006). *Manual de trabajos de grado de especialización, maestrías y tesis doctorales*. Reimpresión. Caracas, Venezuela. Autor.
- Unzueta, J. (2008). *Tratamiento de suelo contaminado con HTP's en un sistema de electrobio-remediación con recirculación*. Instituto tecnológico de Durango. Edición. México.
- U.S. Department of Agriculture (1998). *Soil Quality indicators: ph*. Soil quality information sheet. Descargado: <http://soils.usda.gov>.
- U.S. Environmental protection agency (1998). *Guidelines for ecological risk assessment*. Washington, DC.
- Villatoro, M.; Henríquez, C. Y Sancho (2009). *Comparación de los interpoladores IDW y kriging en la variación espacial de pH, Ca, CICE y P del suelo*. Facultad de Agronomía Universidad de Costa Rica.
- Zamora, A; Ramos, J. Y Arias, M. (2012). *Efecto de la contaminación por hidrocarburos sobre algunas propiedades químicas y microbiológicas de un suelo de sabana*. Instituto de zoología y ecología tropical, facultad de ciencias Universidad Central de Venezuela. Publicado Bioagro Vol.24(1) 2012. Caracas.
- Zapata, R. (2004). *Química de la acidez del suelo*. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. Colombia.

APÉNDICES Y ANEXOS

APÉNDICES

APÉNDICE A: ESTADÍSTICAS DE LAS VARIABLES MEDIDAS EN EL MUESTREO

Tabla A-1

Muestra	pH1	CE [μScm^{-1}]	Humedad Relativa [%]	Retencion Humedad [%]	CO [%]	CIC [meq/100gsuelo]	HTP [%]	MO [%]
M1	4,3	433	6,1	7	11,3	18,67	7,6	19,5
M2	4,7	464	4	60	5,7	117	NA	9,8
M3	4,65	277	5	8	8,8	7,01	7,1	15
M4	6,03	150	10	30	5,7	23,07	NA	10
M5	6,8	563	5	6	10,1	42,2	14	17,4
M6	5,5	343	8	15,8	1,6	55,3	NA	2,8
M7	5	86	7,1	8	12,3	41,9	5	22
M8	3	242	12	50	7,3	148,4	NA	13
M9	7,3	211	-	8	10	26,53	6,2	17
M10	7,6	186	8,6	50	2,9	105,99	NA	5
Estadísticas.	<i>Alpha (significan 5,%)</i>							
Count	10	10	9	10	10	10	5	10
Mean	5,49	295,50	7,31	24,28	7,57	58,61	7,98	13,15
Mean LCL	4,45	186,62	5,30	8,95	5,02	24,20	3,62	8,69
Mean UCL	6,53	404,38	9,32	39,61	10,12	93,02	12,34	17,61
Variance	2,10	23.167,39	6,81	459,05	12,74	2.313,99	12,30	38,85
Standard Deviation	1,45	152,21	2,61	21,43	3,57	48,10	3,51	6,23
Mean Standard Error	0,46	48,13	0,87	6,78	1,13	15,21	1,57	1,97
Coefficient of Variation	0,26	0,52	0,36	0,88	0,47	0,82	0,44	0,47
Minimum	3,00	86,00	4,00	6,00	1,60	7,01	5,00	2,80
Maximum	7,60	563,00	12,00	60,00	12,30	148,40	14,00	22,00
Range	4,60	477,00	8,00	54,00	10,70	141,39	9,00	19,20
Median	5,25	259,50	7,10	11,90	8,05	42,05	7,10	14,00
Median Error	0,18	19,08	0,36	2,69	0,45	6,03	0,88	0,78
Percentile 25% (Q1)	4,66	192,25	5,00	8,00	5,70	23,94	6,20	9,85
Percentile 75% (Q3)	6,61	410,50	8,60	45,00	10,08	93,32	7,60	17,30
IQR	1,95	218,25	3,60	37,00	4,38	69,38	1,40	7,45
MAD (Median Absolute De	0,90	193,50	2,10	4,90	4,25	6,70	6,90	7,30
Coefficient of Dispersion (COD)	0,22	0,46	0,29	1,42	0,36	0,84	0,29	0,36
Mean Deviation	1,16	124,20	2,08	18,58	2,93	39,11	2,41	5,03
Second Moment	1,89	20.850,65	6,06	413,15	11,46	2.082,60	9,84	34,97
Third Moment	-0,05	1.228.114,80	6,91	5.496,90	-13,76	74.140,61	37,07	-62,95
Fourth Moment	7,50	886.654.613,26	79,78	292.098,15	254,26	9.411.105,04	280,58	2.442,96
Sum	54,88	2.955,00	65,80	242,80	75,70	586,07	39,90	131,50
Sum Standard Error	4,59	481,33	7,83	67,75	11,29	152,12	7,84	19,71
Total Sum Squares	320,10	1.081.709,00	535,58	10.026,64	687,67	55.173,75	367,61	2.078,89
Adjusted Sum Squares	18,92	208.506,50	54,51	4.131,46	114,62	20.825,95	49,21	349,67
Geometric Mean	5,30	258,20	6,91	16,54	6,51	41,29	7,48	11,30
Harmonic Mean	5,11	220,71	6,52	11,94	5,15	27,20	7,09	8,96
Mode	#N/A	#N/A	5,00	8,00	5,70	#N/A	#N/A	#N/A
Skewness	-0,02	0,41	0,46	0,65	-0,35	0,78	1,20	-0,30
Skewness Standard Error	0,61	0,61	0,63	0,61	0,61	0,61	0,71	0,61
Kurtosis	2,09	2,04	2,17	1,71	1,94	2,17	2,90	2,00
Kurtosis Standard Error	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,75	0,92
Skewness (Fisher's)	-0,02	0,48	0,56	0,78	-0,42	0,93	1,79	-0,36
Kurtosis (Fisher's)	-0,64	-0,73	-0,43	-1,31	-0,92	-0,50	3,59	-0,81

APÉNDICE A: ESTADÍSTICAS DE LAS VARIABLES MEDIDAS EN EL MUESTREO

Tabla A-2

Muestras	Mn [mg/kg]	Cd [mg/kg]	Cr [mg/kg]	Cu [mg/kg]	Co [mg/kg]	Zn [mg/kg]	Ni [mg/kg]	Fe [mg/kg]	Mo [mg/kg]
M1	40	-	-	8	6,9	44	11	-	ND
M2	69	28	-	23	10	102	16,6	44	ND
M3	45	21	43	17	8	103	41	49	ND
M4	4,7	20	81	13,1	18	75	15	49	ND
M5	51	18	26	8	7	85	14	-	ND
M6	65	9,4	38	8,5	6,8	45	11	44	ND
M7	61	14,37	90	9	7	57	-	42,3	ND
M8	156	15,1	-	-	19	-	-	153	ND
M9	59	14,11	-	-	-	6,03	-	38	ND
M10	90	12	120	9,3	9	144	109	115	ND
Estadísticas	Alpha (significance level)		5,%						
Count	10	9	6	8	9	9	7	8	na
Mean	64,07	16,89	66,33	11,99	10,19	73,45	31,09	66,79	na
Mean LCL	36,04	12,60	28,12	7,43	6,47	42,11	-2,12	30,96	na
Mean UCL	92,10	21,17	104,55	16,54	13,91	104,78	64,30	102,62	na
Variance	1.535,83	31,07	1.325,87	29,68	23,44	1.661,77	1.289,38	1.836,68	na
Standard Deviation	39,19	5,57	36,41	5,45	4,84	40,76	35,91	42,86	na
Mean Standard Error	12,39	1,86	14,87	1,93	1,61	13,59	13,57	15,15	na
Coefficient of Variation	0,61	0,33	0,55	0,45	0,48	0,56	1,16	0,64	na
Minimum	4,70	9,40	26,00	8,00	6,80	6,03	11,00	38,00	na
Maximum	156,00	28,00	120,00	23,00	19,00	144,00	109,00	153,00	na
Range	151,30	18,60	94,00	15,00	12,20	137,97	98,00	115,00	na
Median	60,00	15,10	62,00	9,15	8,00	75,00	15,00	46,50	na
Median Error	4,91	0,78	7,61	0,85	0,67	5,68	6,43	6,71	na
Percentile 25% (Q1)	46,50	14,11	39,25	8,38	7,00	45,00	12,50	43,58	na
Percentile 75% (Q3)	68,00	20,00	87,75	14,08	10,00	102,00	28,80	65,50	na
IQR	21,50	5,89	48,50	5,70	3,00	57,00	16,30	21,93	na
MAD (Median Absolute Deviation)	7,00	5,70	30,00	2,55	1,00	10,00	0,00	3,35	na
Coefficient of Dispersion (Cv)	0,40	0,27	0,49	0,39	0,39	0,42	1,24	0,53	na
Mean Deviation	24,74	4,32	30,67	4,28	3,69	31,50	25,09	33,61	na
Second Moment	1.382,24	27,61	1.104,89	25,97	20,84	1.477,13	1.105,19	1.607,09	na
Third Moment	56.192,74	99,37	11.652,41	155,95	112,12	4.708,95	63.652,53	84.923,50	na
Fourth Moment	8.479.621,79	2.161,90	2.040.385,85	2.015,73	1.136,73	5.373.370,98	5.340.572,01	7.804.044,15	na
Sum	640,70	151,98	398,00	95,90	91,70	661,03	217,60	534,30	na
Sum Standard Error	123,93	16,72	89,19	15,41	14,52	122,29	95,00	121,22	na
Total Sum Squares	54.872,09	2.814,96	33.030,00	1.357,35	1.121,85	61.845,36	14.500,56	48.541,29	na
Adjusted Sum Squares	13.822,44	248,52	6.629,33	207,75	187,53	13.294,18	7.736,31	12.856,73	na
Geometric Mean	50,01	16,11	57,77	11,12	9,39	57,21	21,14	58,19	na
Harmonic Mean	27,75	15,38	50,07	10,46	8,81	32,16	16,92	52,82	na
Mode	#N/A	#N/A	#N/A	8,00	7,00	#N/A	11,00	#N/A	na
Skewness	1,09	0,68	0,32	1,18	1,18	0,08	1,73	1,32	na
Skewness Standard Error	0,61	0,63	0,69	0,65	0,63	0,63	0,67	0,65	na
Kurtosis	4,44	2,84	1,67	2,99	2,62	2,46	4,37	3,02	na
Kurtosis Standard Error	0,92	0,92	0,84	0,91	0,92	0,92	0,88	0,91	na
Skewness (Fisher's)	1,30	0,83	0,43	1,47	1,43	0,10	2,25	1,64	na
Kurtosis (Fisher's)	3,51	0,83	-1,38	1,38	0,42	0,12	5,09	1,45	na

APÉNDICE B

EVALUACIÓN DE LA CORRELACIÓN ENTRE LAS VARIABLES MUESTREADAS UTILIZANDO EL COEFICIENTE DE CORRELACIÓN DE SPEARMAN

Se plantearon las hipótesis

Ho: no existe asociación entre las dos variables.

Ha: existe una relación de asociación entre las variables.

Matriz con resultados del cálculo del coeficiente de correlación de Spearman.

r [adimensional]	TPH [%]	pH	CE	Humedad relativa	Retención humedad	CO	CIC	MO
TPH	1							
pH	-0,20	1						
CE	1	0,2	1					
Humedad relativa	-0,40	-0,4	-0,40	1				
Retención humedad	-0,90	0,4	-0,90	0,4	1			
CO	-0,20	-0,4	-0,2	1	0,85	1		
CIC	0,10	-0,3	0,10	0,40	-0,20	0,70	1	
MO	0,30	0,20	0,30	0,40	0,20	0,30	0,60	1

ANEXOS

ANEXO A

Artículos 48 al 50 del Decreto 2635 y sus anexos.

**Normas para el control de la recuperación de
materiales peligrosos y el manejo de los desechos
peligrosos**

(Gaceta Oficial Extraordinaria No 5245 del 3 de agosto de
1998)

...

SECCIÓN II

De las Disposiciones Técnicas para el Manejo de Desechos Peligrosos Generados por la Exploración y Producción de Petróleo

Artículo 48.- Los rípios y fluidos de perforación elaborados en base agua se podrán disponer conforme a las siguientes prácticas:

- . Confinamiento en el suelo
- . Esparcimiento en suelos.
- . Disposición final en cuerpos de agua superficiales.
- . Inyección en acuíferos no aprovechables, yacimientos petroleros o acuíferos asociados.

Parágrafo Único: El Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables podrá autorizar otras prácticas, previa demostración por parte del interesado de la factibilidad técnica y ambiental de su aplicación.

Artículo 49.- La práctica de confinamiento en el suelo se realizará cumpliendo con las siguientes condiciones:

- 1) El área de disposición final no debe ser inundable y poseer una capa o membrana impermeabilizante en sus paredes, fondo y tope. Cuando el desecho exceda las concentraciones máximas permisibles en lixiviados establecidas en el Anexo D, deberá ser tratado hasta cumplir con dichos límites.
- 2) Los desechos deberán ser mezclados con suelo autóctono u otro material absorbente que les confiera la resistencia y compactación del suelo circundante.
- 3) La mezcla suelo/desecho resultante no debe exceder 50% de humedad y deberá cumplir los parámetros indicados en la lista que figura en este mismo artículo.
- 4) El tope de la mezcla resultante se encontrará por lo menos a 1 metro de la superficie.
- 5) La profundidad del acuífero aprovechable más superficial será mayor de 6 metros y el fondo de la fosa se encontrará por lo menos a 1.5 metros por encima del mismo.
- 6) El área de confinamiento deberá sellarse con suelo y restablecer la cobertura vegetal, empleando plantas preferiblemente de especies propias de la localidad, que no sean frutales y que se adapten a las condiciones presentes.

- 7) Límites de la mezcla suelo/desecho con fines de confinamiento en el suelo son los siguientes:

pH	6 - 9
Conductividad eléctrica (mmhos/cm)	< 12
Relación de adsorción de sodio (RAS)	< 12
Aceites y grasas (porcentaje en peso)	< 3 %
Arsénico	40 mg/kg
Bario	40.000 mg/kg
Cadmio	10 mg/kg
Mercurio	10 mg/kg
Selenio	10 mg/kg
Plata	10 mg/kg
Cromo	500 mg/kg
Zinc	500 mg/kg
Plomo	500 mg/kg

Artículo 50.- La práctica de esparcimiento en suelos se llevará a cabo cumpliendo con las siguientes condiciones:

1. El área de disposición final debe estar alejada por lo menos 500 m de cuerpos de agua o fuera de la planicie de inundación de dichos cuerpos, de acuerdo a la información hidrológica existente.
2. La topografía del área de disposición final deberá tener una pendiente menor de 3 %, orientada hacia el cuerpo de agua superficial más cercana.
3. El desecho no debe exceder las concentraciones máximas permisibles en lixiviados, establecidas en el Anexo D.
4. La mezcla suelo/desecho debe cumplir con los parámetros establecidos en la lista siguiente:

pH	5 - 8
Conductividad eléctrica (mmhos/cm).	< 3,5
Cloruros totales (ppm)	< 2.500
Relación de adsorción de Sodio (RAS)	< 8
Aluminio intercambiable (meq/100 gr)	< 1,5
Saturación con bases (%)	> 80
Aceites y grasas (% en peso)	≤1
Arsénico	25 mg/kg
Bario	20.000 mg/kg
Cadmio	8 mg/kg
Mercurio	1 mg/kg
Selenio	2 mg/kg
Plata	5 mg/kg
Cromo	300 mg/kg
Cinc	300 mg/kg
Plomo	150 mg/kg

ANEXO A

CONCENTRACIONES MÁXIMAS PERMISIBLES EN LIXIVIADOS

Constituyente	Concentración máxima permitida (mg/l)	Constituyente	Concentración máxima permitida (mg/l)
Arsénico	5.0	Benceno	0.5
Bario	100.0	Éter bis (2- cloro etílico)	0.05
Cadmio	1.0	Clorobenceno	100.0
Cromo hexavalente	5.0	Cloroformo	6.0
Níquel	5.0	Cloruro de metilo	8.6
Mercurio	0.2	Cloruro de vinilo	0.2
Plata	5.0	1,2-diclorobenceno	4.3
Plomo	5.0	1,4-diclorobenceno	7.5
Selenio	1.0	1,2-dicloroetano	0.5
Acrilonitrilo	5.0	1,1- dicloroetileno	0.7
Clordano	0.03	Disulfuro de carbono	14.4
O-cresol	200.0	Fenol	14.4
M-cresol	200.0	Hexaclorobenceno	0.13
P-cresol	200.0	Hexacloro- 1,3- butadieno	0.5
Acido 2,4- diclo-rofenoxiacetico.	10.0	Isobutanol	36.0
2,4- dinitrotolueno	0.13	Etilmetilcetona	200.0
Endrin	0.02	Piridina	5.0
Heptacloro (y su epóxido)	0.008	1,1,1,2- tetracloroetano	10.0
Hexacloroetano	3.0	1,1,2,2- tetracloroetano	1.3
Lindano	0.4	Tetracloruro de carbono	0.5
Metoxicloro	10.0	Tetracloroetileno	0.7
Nitrobenzeno	2.0	Tolueno	14.4
Pentaclorofenol	100.0	1,1,1-tricloroetano	30.0
2,3,4,6- tetraclorofenol	1.5	1,1,2- tricloroetano	1
Toxafeno (canfe- noclorado técnico)	0.5	Tricloroetileno	0.5
2,4,5- triclorofenol	400.0	2,4,6- triclorofenol	2.0
Ácido 2,4,5- tricloro fenoxipropionico	1.0		

ANEXO B

NORMAS PARA REFERIR LOS LEVANTAMIENTOS GEODÉSICOS Y TOPOGRÁFICOS AL SISTEMA GEODÉSICO NACIONAL.

El presente documento presenta la definición del Sistema Geodésico Nacional, al cual deben referirse los levantamientos geodésicos y topográficos, según el artículo No. 1 de la Ley de Geografía, Cartografía y Catastro Nacional y las normas para su referenciación.

1. El sistema geodésico de referencia se entenderá como el conjunto de parámetros físicos y geométricos que definen el marco de referencia fundamental para los trabajos geodésicos y cartográficos. Como marco geodésico se adopta la Red Geocéntrica Venezolana REGVEN.

Se define como Red Geocéntrica Venezolana, al conjunto de vértices situados sobre el terreno, dentro del territorio nacional, representados físicamente por media de monumentos permanentes o marcas geodésicas y cuya posición en la época adoptada es conocida con mucha exactitud.

REGVEN materializa en Venezuela la densificación de la Red SIRGAS (Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas), la cual a su vez representa al ITRF (International Terrestrial Reference Frame), en América. REGVEN se encuentra referida al ITRF 94, época 1995.4 y como elipsoide asociado el GRS-80.

Constantes del Elipsoide GRS – 80

$$\begin{aligned} a &= 6378137 \text{ m} \\ f &= 1: 298.257222101 \\ e^2 &= 0.00669438002290 \\ GM &= 3986005 * 10^8 \text{ m}^3\text{s}^{-2} \\ J_2 &= 108263 * 10^{-8} \\ \omega &= 7292115 * 10^{-11} \text{ rads}^{-1} \end{aligned}$$

El Datum oficial se denomina SIRGAS-REGVEN ó REGVEN.

El sistema geodésico nacional REGVEN deberá ser adoptado en todos los trabajos de georreferenciación que realice la administración pública, así como las instituciones privadas relacionadas.

2. El marco de referencia nacional lo forma la Red Geocéntrica venezolana REGVEN, en sus diferentes órdenes de exactitud A, B, C; y representa el control geodésico básico y oficial más exacto en Venezuela. Dependiendo de la exactitud, características y

especificaciones técnicas requeridas para un levantamiento determinado, se podrá utilizar la red de triangulación y poligonación, cuyas coordenadas en el Datum La Canoa (PSAD 56, Elipsoide Internacional) han sido transformadas a REGVEN (ITRF 94, época 1995.4- GRS 80) utilizando los parámetros de transformación para Venezuela PATVEN 97.

La vinculación al Sistema Geodésico Nacional REGVEN, se realizará de acuerdo a la metodología más conveniente para alcanzar la exactitud requerida, ya sea utilizando técnicas convencionales o modernas como el GPS.

4. Las coordenadas finales deben ser expresadas en UTM y Geodésicas.

5. Para la transformación de coordenadas del sistema La Canoa a REGVEN y viceversa, se utilizarán los parámetros de transformación para Venezuela. PATVEN 97.

PARÁMETROS DE TRANSFORMACIÓN PARA VENEZUELAN PATVEN-97 PSAD 56 (CANOA) A REGVEN.

DX (m) = -270,933	EX (") = -5,266
DY (m) = 1 1 5 , 5 9 9	EY (") = -1,238
DZ (m) = -360,226	EZ (") = 2,381
	FE (ppm) = -5,109

COORDENADAS DEL PUNTO FUNDAMENTAL

$$\begin{aligned} XM &= 2464351,59 \\ M &= -5783466,61 \\ ZM &= 974809,81 \end{aligned}$$

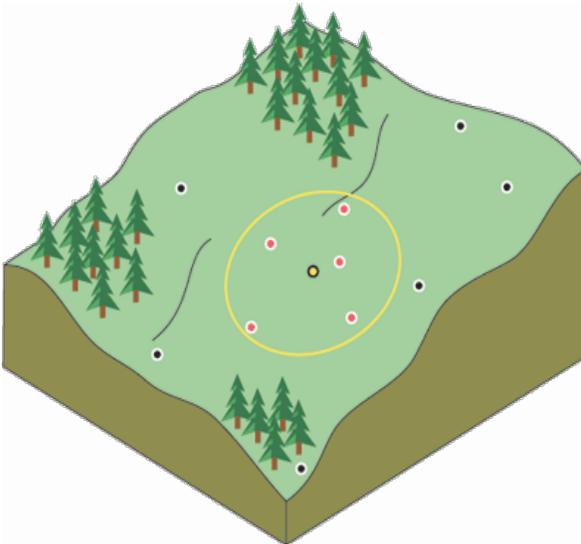
Estos parámetros podrán ser incorporados en un modelo matemático que permita su aplicación, ya sea con la inclusión total o parcial (tres traslaciones) de los mismos en el modelo. De cualquier manera, deberá indicarse en el proyecto o estudio realizado, cuantos parámetros se utilizaron, así como, el modelo empleado.

6. En relación a las alturas, los puntos pertenecientes a los levantamientos geodésicos verticales, deberán referirse al Datum o nivel de referencia vertical, definido por el Mareógrafo de la Guaira.

ANEXO C

RESUMEN FUNCIONAMIENTO DE LA HERRAMIENTA DE INTERPOLACIÓN INVERSE DISTANCE WEIGTED (IDW) DEL ANÁLISIS ESPACIAL DE ARCGIS DESKTOP DE ESRI®.

La interpolación mediante distancia inversa ponderada determina los valores de celda a través de una combinación ponderada linealmente de un conjunto de puntos de muestra. La ponderación es una función de la distancia inversa. La superficie que se interpola debe ser la de una variable dependiente de la ubicación.



Vecindad de IDW del punto seleccionado

Este método presupone que la variable que se representa cartográficamente disminuye su influencia a mayor distancia desde su ubicación de muestra.

Controlar la influencia con el parámetro Potencia

El método IDW está basado principalmente en la inversa de la distancia elevada a una potencia matemática. El parámetro **Potencia** le permite controlar la significancia de puntos conocidos en los valores interpolados basándose en la distancia desde el punto de salida. Es un número real positivo y su valor predeterminado es 2.

Al definir un valor de potencia más alto, se puede poner más énfasis en los puntos más cercanos. Entonces, los datos cercanos tendrán más influencia y la superficie tendrá más detalles (será menos suave). A medida que aumenta la potencia, los valores interpolados comienzan a acercarse al valor del punto de muestra más cercano. Al especificar un valor más bajo de potencia, los puntos circundantes adquirirán más influencia que los que están más lejos, lo que resulta en una superficie más suave.

Debido a que la fórmula de IDW no está relacionada con ningún proceso físico real, no hay forma de determinar que un valor de potencia en particular es demasiado grande. Como guía general, una potencia de 30 se considera extremadamente grande y su uso sería cuestionable. También tenga en cuenta que, si las distancias o el valor de potencia son grandes, los resultados pueden ser incorrectos.

Podría decirse que el valor óptimo para la potencia es donde el error absoluto medio mínimo se encuentra en su punto más bajo. La ArcGIS Geostatistical Analyst extensión proporciona una forma de investigar esto.

Limitar los puntos utilizados para la interpolación

Las características de la superficie interpolada también pueden controlarse limitando los puntos de entrada que se utilizan en el cálculo de cada valor de celda de salida. Limitar la cantidad de puntos de entrada considerados puede mejorar la velocidad de procesamiento. También tenga en cuenta que los puntos de entrada que están lejos de la ubicación de la celda donde se realiza la predicción pueden tener escasa o ninguna correlación espacial, esto puede ser una razón para eliminarlos del cálculo.

Puede especificar la cantidad de puntos a utilizar directamente o especificar un radio fijo dentro del cual se incluirán los puntos en la interpolación.

Radio de búsqueda variable

Con un radio de búsqueda variable, se especifica la cantidad de puntos utilizados para calcular el valor de la celda interpolada, lo que hace que la distancia del radio varíe para cada celda interpolada, según qué tan lejos deba buscar alrededor de cada celda interpolada para alcanzar la cantidad especificada de puntos de entrada. Entonces, algunas vecindades serán pequeñas y otras grandes según la densidad de los puntos medidos cerca de la celda interpolada. También puede especificar una distancia máxima (en unidades de mapa) que el radio de búsqueda no debe sobrepasar.

ANEXO C

Si el radio de una vecindad determinada alcanza la distancia máxima antes de obtener la cantidad especificada de puntos, la predicción de esa ubicación se realizará basada en la cantidad de puntos medidos dentro de la distancia máxima. Por lo general, utilizará vecindades más pequeñas o una cantidad mínima de puntos cuando el fenómeno tiene una gran cantidad de variación.

Radio de búsqueda fijo

Para un radio de búsqueda fijo se requiere una distancia de vecindad y una cantidad mínima de puntos. La distancia indica el radio del círculo de la vecindad (en unidades de mapa). La distancia del radio es constante, por lo que, para cada celda interpolada, el radio del círculo utilizado para hallar los puntos de entrada es el mismo. La cantidad mínima de puntos indica la cantidad mínima de puntos medidos a usar dentro de la vecindad. Todos los puntos medidos que caen dentro del radio se utilizarán en el cálculo de cada celda interpolada. Cuando hay menos puntos medidos en la vecindad que el mínimo especificado, el radio de búsqueda aumentará hasta que pueda abarcar la cantidad mínima de puntos. El radio de búsqueda fijo especificado se utiliza para cada celda interpolada (celda central) en el área de estudio; por lo tanto, si sus puntos medidos no están distribuidos de forma pareja (rara vez lo están), es posible que haya diferentes cantidades de puntos medidos utilizados en las diferentes vecindades para las diversas predicciones.

Tomado del manual de referencias de herramientas de análisis espacial de Arc Gis for Desktop de ESRI.

ANEXO D: LISTADO DE ALGUNAS APLICACIONES GIS DISPONIBLES EN EL MERCADO

Software SIG	Windows	Mac OS X	GNU/Linux	BSD	Unix	Entorno Web	Licencia de software
ABACO DbMAP	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Java	Software no libre
ArcGIS	Sí	No	Sí	No	Sí	Sí	Software no libre
Autodesk Map	Sí	No	No	No	No	Sí	Software no libre
Bentley Map	Sí	No	No	No	No	Sí	Software no libre
Capaware	Sí (C++)	No	Sí	No	No	No	Libre: GNU GPL
Caris	Sí	No	No	No	No	Sí	Software no libre
CartaLinx	Sí	No	No	No	No	No	Software no libre
El Suri	Java	Java	Java	Java	Java	No	Libre: GNU
Geomedia	Sí	No	No	No	Sí	Sí	Software no libre
GeoPista	Java	Java	Java	Java	Java	Sí	Libre: GNU
GestorProject - PDAPProject	Sí	No	No	No	No	Java	Software no libre
GeoServer	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Java	Libre: GNU
GRASS	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Mediante pyWPS	Libre: GNU
gvSIG	Java	Java	Java	Java	Java	No	Libre: GNU
IDRISI	Sí	No	No	No	No	No	Software no libre
ILWIS	Sí	No	No	No	No	No	Libre: GNU
Generic Mapping Tools	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Libre: GNU
JUMP	Java	Java	Java	Java	Java	No	Libre: GNU
Kosmo	Java	Java	Java	Java	Java	En desarrollo	Libre: GNU
LocalGIS	Java	Java	Java	Java	Java	Sí	Libre: GNU
LatinoGis	Sí	No	No	No	No	Sí	Software no libre
Manifold	Sí	No	No	No	No	Sí	Software no libre
MapGuide Open Source	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	LAMP/WAMP	Libre: LGPL
MapInfo	Sí	No	Sí	No	Sí	Sí	Software no libre
MapServer	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	LAMP/WAMP	Libre: BSD
Maptitude	Sí	No	No	No	No	Sí	Software no libre
MapWindow GIS	Sí	No	No	No	No	No	Libre: MPL
MiraMon	Sí (C)	No	No	No	No	Sí	Software no libre
ortoSky	Sí (C++)	No	No	No	No	No	Software no libre
QGIS	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Libre: GNU
SAGA GIS	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	No	Libre: GNU
GE Smallworld	Sí	?	Sí	?	Sí	Sí	Software no libre
SavGIS	Sí	No	No	No	No	Integración con Google Maps	Software no libre: Freeware
SEXTANTE	Java	Java	Java	Java	Java	No	Libre: GNU
SITAL	Sí	No	No	No	No	Integración con Google Maps	Software no libre
SPRING	Sí	No	Sí	No	Solar	No	Software no libre: Freeware
SuperGIS	Sí	No	No	No	No	Sí	Software no libre
TatukGIS	Sí	No	No	No	No	?	Software no libre
TNTMips	Sí	No	No	No	Sí	Sí	Software no libre
TransCAD	Sí	No	No	No	No	Sí	Software no libre
uDIG	Sí	Sí	Sí	No	No	No	Libre: LGPL
GeoStratum	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Software no libre
ASINELSA SIDAC	Java	Java	Java	Java	Java	Sí	Software no libre

**ANEXO E: VALORES CRÍTICOS DEL COEFICIENTE DE SPEARMAN PARA PRUEBAS DE
1 COLA**

<i>n</i>	$\alpha = .05$	$\alpha = .025$	$\alpha = .01$	$\alpha = .005$
5	.900	—	—	—
6	.829	.886	.943	—
7	.714	.786	.893	—
8	.643	.738	.833	.881
9	.600	.683	.783	.833
10	.564	.648	.745	.794
11	.523	.623	.736	.818
12	.497	.591	.703	.780
13	.475	.566	.673	.745
14	.457	.545	.646	.716
15	.441	.525	.623	.689
16	.425	.507	.601	.666
17	.412	.490	.582	.645
18	.399	.476	.564	.625
19	.388	.462	.549	.608
20	.377	.450	.534	.591
21	.368	.438	.521	.576
22	.359	.428	.508	.562
23	.351	.418	.496	.549
24	.343	.409	.485	.537
25	.336	.400	.475	.526
26	.329	.392	.465	.515
27	.323	.385	.456	.505
28	.317	.377	.448	.496
29	.311	.370	.440	.487
30	.305	.364	.432	.478

Fuente: Mendenhall, 2010.

ANEXO F: PARÁMETROS PARA CÁLCULOS Y DOSIS DE REFERENCIA PARA RIESGO POR INGESTIÓN, INHALACIÓN Y CONTACTO DÉRMICO DE CONTAMINANTES.

Tabla. F-1. Ingestión accidental de tierra (suelo)

Parámetro	Unidades	Residencial	Industrial	Recreacional		Agrícola
Concentración en el suelo, Csuelo	mg/kg		Específico para cada contaminante			
Factor de conversión factor, CF1	kg/mg		10 ⁻⁶			
Frecuencia de exposición, EF	días/año	350 (U.S. EPA, 1989a)	250 U.S. EPA, 1991b	40 U.S. EPA, 1991b		350 U.S. EPA, 1991b
Fracción de ingestión proveniente de la fuente contaminada, FI	adimensional		Específico para cada sitio; en ausencia de información emplear FI=1			
Duración de la exposición, ED	años	24 (adulto) 6 (niño) (U.S. EPA,	250 U.S. EPA, 1991b			24 (adulto) 6 (niño) (U.S. EPA, 1989a)
Tasa de ingestión de suelo, IR	mg/día	100 (adulto) 200 (niño) (U.S. EPA, 1991b)	50 (adulto) (U.S. EPA, 1991b)			100 (adulto) 200 (niño) (U.S. EPA, 1989a)
Peso corporal, BW	kg		70 (adulto), 15 (niño) (U.S. EPA, 1991b)			
Factor de conversión factor, CF2	días/año		365			
Período vital, LT	años		70 (U.S. EPA, 1989a)			
Tiempo de promediación, AT	años		LT (cancerígeno) ED (no cancerígeno)			

Fuente: Rihm y Anacona, 2004

ANEXO F: PARÁMETROS PARA CÁLCULOS Y DOSIS DE REFERENCIA PARA RIESGO POR INGESTIÓN, INHALACIÓN Y CONTACTO DÉRMICO DE CONTAMINANTES.

Tabla F-2 Parámetros de inhalación de material particulado y compuestos volátiles

Parámetro	Unidades	Residencial	Industrial	Recreacional	Agrícola
Concentración en el suelo, Csuelo	mg/kg	Específico para cada contaminante			
Frecuencia de exposición, EF	días/año	350 (U.S. EPA, 1989a)	250 (U.S. EPA, 1989a)	40 (U.S. EPA, 1989a)	350 (U.S. EPA, 1989a)
Duración de la exposición, ED	años	30 (U.S. EPA, 1989a)	25 (U.S. EPA, 1989a)	30 (U.S. EPA, 1989a)	
Factor de volatilización, VF	m ³ /kg	Específico para cada contaminante			
Fracción del terreno (sitio) que tiene una cubierta vegetal, V	adimensional	Específico para cada sitio; en ausencia de información emplear V=0,5 (U,S, EPA,1996)			
Velocidad de viento Promedio anual, Um	m/s	4,69 (U,S, EPA,1996)			
Valor umbral equivalente a la velocidad de viento a 7 m sobre el nivel del suelo, Ut	m/s	11,32 (U,S, EPA,1996)			

ANEXO F: PARÁMETROS PARA CÁLCULOS Y DOSIS DE REFERENCIA PARA RIESGO POR INGESTIÓN, INHALACIÓN Y CONTACTO DÉRMICO DE CONTAMINANTES.

Tabla F-2 Continuación: Parámetros de inhalación de material particulado y compuestos volátiles

Parámetro	Unidades	Residencial	Industrial	Recreacional	Agrícola
Función de distribución de la velocidad del viento, F(x)	adimensional	0,194 (Cowherd et al., 1985)			
Inverso de la concentración promedio en el centro de una fuente de 0,5 acres, Q/C	(g·m ³)/ (m ² ·s·kg)	90,8 (U,S, EPA,1996)			
Factor de conversión, CF ₃	s/hora	3600			
Tasa de inhalación, IRaire	m ³ /día	20 (U.S. EPA,1989a)		6,7 (8 horas) (U.S. EPA,1992)	20 (U.S. EPA,1989a)
Factor de conversión factor, CF ₂	días/año	365			
Peso corporal, BW	kg	70 (adulto) (U.S. EPA, 1991b)			
Período vital, LT	años	70 (U.S. EPA, 1989a)			
Tiempo de promediación, AT	años	LT (cancerígeno) ED (no cancerígeno)			

Fuente: Rihm y Anacona, 2004

ANEXO F: PARÁMETROS PARA CÁLCULOS Y DOSIS DE REFERENCIA PARA RIESGO POR INGESTIÓN, INHALACIÓN Y CONTACTO DÉRMICO DE CONTAMINANTES.

Tabla F-3 Parámetros para contacto dérmico

Parámetro	Unidades	Residencial	Industrial	Recreacional	Agrícola
Concentración en el suelo, Csuelo	mg/kg	Específico para cada contaminante			
Factor de conversión, CF4	(kg·cm ²)/ (mg·m ²)	0,01			
Superficie expuesta de piel, SA	m ² /día	0,53 Manos, antebrazos cabeza, piernas (U.S. EPA, 1992)	0,316 Manos, antebrazos, cabeza (U.S. EPA, 1992)	0,53 Manos, antebrazos, cabeza, piernas (U.S. EPA, 1992)	
Factor de adherencia de la tierra (suelo) a la piel, AF	mg/cm ²	1 (U.S. EPA, 1992)			
Factor de absorción dérmica, ABS	adimensional	0,01 (compuestos orgánicos) 0,001 (compuestos inorgánicos) (U.S. EPA, 2000)			
Frecuencia de exposición, EF	días/año	350 (U.S. EPA, 1991a)	250 (U.S. EPA, 1991a)	40 (U.S. EPA, 1992)	350 (U.S. EPA, 1991a)
Duración de la exposición, ED	años	30 (U.S. EPA, 1989a)	25 (U.S. EPA, 1991a)	30 (U.S. EPA, 1989a)	
Peso corporal, BW	kg	70 (adulto) (U.S. EPA, 1991a)			

**ANEXO F: PARÁMETROS PARA CÁLCULOS Y DOSIS DE REFERENCIA PARA RIESGO POR INGESTIÓN,
INHALACIÓN Y CONTACTO DÉRMICO DE CONTAMINANTES.**

Tabla F-3 Continuación. Parámetros para contacto dérmico

Parámetro	Unidades	Residencial	Industrial	Recreacional	Agrícola
Factor de conversión factor, CF2	días/año			365	
Período vital, LT	años			70 (U.S. EPA, 1989a)	
Tiempo de promediación, AT	años			LT (cancerígeno) ED (no cancerígeno)	

Fuente: Anacona y Rihm, 2004

ANEXO F: PARÁMETROS PARA CÁLCULOS Y DOSIS DE REFERENCIA PARA RIESGO POR INGESTIÓN, INHALACIÓN Y CONTACTO DÉRMICO DE CONTAMINANTES.

Tabla F-4 Dosis de referencia de los contaminantes más comunes en suelos impactados por hidrocarburos

Contaminante		Dosis por inhalación [mg/kg·día]	Dosis por ingestión [mg/kg·día]	Dosis por contacto dérmico [mg/kg·día]
Metales	Antimonio	----	4,00E-4	4,00E-4
	Arsénico`	8,60E-6	3,00E-4	3,00E-4
	Bario	1,40E-4	2,00E-1	2,00E-1
	Berilio	2,00E-6	2,00E-6	2,00E-6
	Cadmio	5,70E-6	1,00E-3	1,00E-3
	Cromo	----	1,50	1,50
	Cobalto	5,70E-6	2,00E-2	2,00E-2
	Cobre	----	4,00E-2	4,00E-2
	Molibdeno	----	5,00E-3	5,00E-3
	Níquel	----	2,00E-2	2,00E-2
	Selenio	5,70E-6	5,00E-3	5,00E-3
	Talio	----	6,50E-5	6,50E-5
	Vanadio	----	5,00E-3	5,00E-3
	Zinc	----	3,00E-1	3,00E-1
Fracción ligera de hidrocarburos	Manganeso	1,40E-5	2,40E-2	2,40E-2
	Alifáticos	5	18,4	18,4
Fracción media de hidrocarburos	Aromáticos	0,2	4	4
	Alifáticos	0,1	1	1
fracción pesada de hidrocarburos	Aromáticos	0,04	0,2	0,2
	Alifáticos	2	---	---
	Aromáticos	0,23	---	----

Fuente: USEPA 2008, ATDSR 1992, ATDSR 2012, Corrales y Guanipa 2016.