

CIS0830-TK01

PROTOTIPO PARA VISUALIZAR LA CONTAMINACIÓN EN EL AIRE DE BOGOTÁ

ÁLVARO ERNESTO CÁCERES LARA

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA

FACULTAD DE INGENIERIA

CARRERA DE INGENIERIA DE SISTEMAS

BOGOTÁ, D.C.

2009

CIS0830-TK01

PROTOTIPO PARA VISUALIZAR LA CONTAMINACIÓN EN EL AIRE DE BOGOTÁ

Autor

Álvaro Ernesto Cáceres Lara

MEMORIA DEL TRABAJO DE GRADO REALIZADO PARA CUMPLIR UNO DE LOS
REQUISITOS PARA OPTAR AL TITULO DE INGENIERO DE SISTEMAS

Director

Ing. César Julio Bustacara Medina

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA

FACULTAD DE INGENIERIA

CARRERA DE INGENIERIA DE SISTEMAS

BOGOTÁ, D.C.

JUNIO DE 2009

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
FACULTAD DE INGENIERIA
CARRERA DE INGENIERIA DE SISTEMAS

Rector Magnífico

Joaquín Emilio Sánchez García S.J.

Decano Académico Facultad de Ingeniería

Ingeniero Francisco Javier Rebolledo Muñoz

Decano del Medio Universitario Facultad de Ingeniería

Padre Sergio Bernal Restrepo S.J.

Director de la Carrera de Ingeniería de Sistemas

Ingeniero Luis Carlos Díaz Chaparro

Director Departamento de Ingeniería de Sistemas

Ingeniero Germán Alberto Chavarro Flórez

Artículo 23 de la Resolución No. 1 de Junio de 1946

“La Universidad no se hace responsable de los conceptos emitidos por sus alumnos en sus proyectos de grado. Sólo velará porque no se publique nada contrario al dogma y la moral católica y porque no contengan ataques o polémicas puramente personales. Antes bien, que se vean en ellos el anhelo de buscar la verdad y la Justicia”

ABSTRACT

The “Secretaría Distrital de Ambiente” is the Colombian government agency responsible, among other functions, to represent graphically the air pollution in Bogota, from a monitoring done through measuring stations. Currently there are two disadvantages of the display model used: The number of monitoring stations is not enough to show the information of the contamination of the entire city and the indices of air pollution vary rapidly in time. A solution has been given to these problems by creating a prototype that uses scientific visualization algorithms constructed from an interpolation method called Inverse Distance Weighted.

RESUMEN

La Secretaría Distrital de Ambiente es la entidad gubernamental colombiana encargada, entre otras funciones, de representar gráficamente la contaminación en el aire de Bogotá, a partir de un monitoreo que se realiza por medio de unas estaciones de medición. Actualmente existen dos inconvenientes respecto al modelo de visualización utilizado: El número de estaciones de monitoreo no es suficiente para mostrar la información de la contaminación de toda la ciudad y los índices de la contaminación atmosférica fluctúan muy rápido en el tiempo. Se ha dado una solución a estos dos inconvenientes mediante la creación de un prototipo de visualización científica que utiliza dos algoritmos construidos a partir del método de interpolación denominado Inverse Distance Weighted.

RESUMEN EJECUTIVO

Este trabajo de grado es un prototipo para visualizar la contaminación en el aire de Bogotá, brinda una solución práctica a dos inconvenientes relacionados con la presentación gráfica de la contaminación atmosférica en la ciudad. En primer lugar el número de estaciones de monitoreo no es suficiente para mostrar la información de la contaminación de toda la ciudad y en segundo lugar, los índices de la contaminación atmosférica fluctúan muy rápido en el tiempo. La gestión del monitoreo y la administración de los datos es manejada por la Red de Monitoreo de Calidad de Aire de Bogotá (RMCAB), esta es una sección de la Secretaría Distrital de Ambiente (SDA). La Secretaría es la entidad gubernamental que entre otras funciones está encargada de monitorear y administrar los recursos ambientales de Bogotá.

El proyecto está inspirado en la problemática ambiental de la contaminación en el aire. La contaminación atmosférica genera problemas de bienestar y de salud a los habitantes y resulta un inconveniente para el entorno natural. Esta problemática es de gran interés para muchas personas, por lo cual se han desarrollado métodos para medirla, controlarla y prevenirla.

Para la medición de la contaminación en el aire de la ciudad, la SDA ha instalado varias estaciones de monitoreo para distintos tipos de contaminantes en diferentes zonas de la ciudad. Estas estaciones mandan los datos a la SDA de manera continua para que estos se puedan gestionar.

A partir de esta información, se pueden realizar diferentes estudios como estadísticas o predicciones. Uno en particular es la visualización de la contaminación.

La escasez de datos y la necesidad de realizar un seguimiento en el tiempo a partir de fechas específicas promueve la creación de un software que presente una alternativa de solución. El proyecto se desarrolló a partir de una metodología de carácter investigativo, la cual se desarrolló en cuatro fases:

- a) Levantamiento de información sobre la actual forma de medir y visualizar la contaminación en Bogotá.
- b) Desarrollo de un algoritmo de visualización de partículas a partir de datos suministrados en puntos concretos.

- c) Desarrollo de un prototipo que ejecute la visualización de datos provenientes de fechas particulares.
- d) Ejecución de pruebas en la SDA para realizar la validación de los resultados obtenidos.

El desarrollo del levantamiento de información se realizó mediante un conjunto de entrevistas en la SDA, donde se conocieron los mecanismos de medición que se usan actualmente. Estos consisten en las estaciones de monitoreo que existen en la ciudad. Por otra parte la visualización se realiza por medio del software *ArcView*.

Posteriormente se desarrollaron dos algoritmos de visualización que fueron llamados: IDW e IDW2. Dichos algoritmos están basados en el método de interpolación multivariable: *Inverse Distance Weighted*. Se encargan de asignar valores de contaminación a regiones desconocidas, a partir de valores conocidos.

El algoritmo IDW realiza una visualización de la contaminación sobre toda la ciudad, y el algoritmo IDW2 es una adaptación del algoritmo que permite observar la contaminación a partir de un radio de las estaciones que miden la contaminación.

En la tercera etapa se desarrolló una aplicación de software que permite mostrar la funcionalidad de los algoritmos IDW e IDW2, a partir de datos consultados en la base de datos de la SDA.

El prototipo final se presentó formalmente a la SDA, para realizar la instalación, las pruebas y de esta forma validar la funcionalidad del software el cual generó resultados exitosos.

Se hicieron los ajustes y se dispuso el software para que los funcionarios de la RMCAB se encarguen de realizar la visualización de partículas contaminantes en el aire de Bogotá.

Para finalizar se describen las principales funciones del software:

- a) Visualizar la contaminación a partir de un tipo de contaminante y de una fecha horaria, es decir: Día, Mes, Año, Hora.
- b) Visualizar la contaminación a partir de un tipo de contaminante y de una fecha diaria, es decir: Día, Mes, Año. Las fechas registradas corresponden a los datos tomados por las estaciones de monitoreo de la RMCAB.
- c) Escoger el tipo de algoritmo: IDW e IDW2.
- d) Se puede escoger el tipo de algoritmo para la presentación de los datos con sus respectivos parámetros de entrada como: Potencia para IDW e IDW 2, y radio para IDW2. La potencia define el nivel de realismo de la presentación y el radio define el rango de las estaciones de monitoreo.

Tabla de Contenido

1.	Introducción	12
1.1.	Problemática	12
1.2.	¿Qué se está haciendo en Bogotá?.....	13
1.3.	Oportunidad.....	14
1.4.	Formulación.....	15
1.5.	Justificación.....	15
1.6.	Objetivo general	17
1.7.	Objetivos específicos.....	17
2.	Marco Teórico	18
2.1.	Instituciones.....	18
2.1.1.	Secretaría Distrital de Ambiente	18
2.1.2.	Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá.....	18
2.1.3.	Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos.....	21
2.2.	Contexto	22
2.2.1.	Bogotá	22
2.2.2.	Contaminación en Bogotá.....	23
2.3.	Definiciones.....	24
2.3.1.	Sistemas de Información Geográficos	24
2.3.2.	Visualización Científica	24
2.3.3.	Meteorología	24
2.3.4.	Dispersión	24
2.3.5.	Modelos de dispersión	25
2.4.	Métodos de Interpolación.....	26
2.4.1.	Inverse Distance Weighted (IDW).....	26

2.4.2.	Kriging	26
2.4.3.	Natural Neighbor.....	28
2.4.4.	Spline	29
2.4.5.	Trend	30
2.4.6.	PointInterp.....	31
2.5.	Contaminantes	32
2.5.1.	Material particulado menor a 10 micras (PM 10).....	32
2.5.2.	Ozono (O3).....	32
2.5.3.	Monóxido de Carbono (CO)	33
2.5.4.	Partículas suspendidas totales (PST).....	33
2.5.5.	Dióxido de Azufre (SO2)	34
2.5.6.	Lluvia ácida.....	34
2.5.7.	Dióxido de Nitrógeno (NO2)	35
2.6.	Software.....	36
2.6.1.	Java.....	36
2.6.2.	JOGL.....	36
2.6.3.	ArcView	36
2.6.4.	Oracle XE.....	37
3.	Desarrollo Conceptual.....	38
3.1.	Algoritmos IDW e IDW2.....	38
3.2.	Fórmula matemática Inverse Distance Weighted.....	39
3.3.	Justificación del uso del método Inverse Distance Weighted	40
3.5.	Algoritmo IDW2	41
4.	Desarrollo de Software.....	43
4.1.	Análisis	44

4.2.	Diseño Arquitectónico.....	45
4.2.1.	Casos de Uso	45
4.2.2.	Patrón arquitectónico	48
4.2.3.	Vista de datos	49
4.3.	Diseño detallado	51
4.3.1.	Paquete Controlador.....	51
4.3.2.	Paquete Modelo.....	52
4.3.3.	Paquete Vista.....	53
4.4.	Implementación y pruebas.....	54
5.	Pruebas y Resultados	55
5.1.	Algoritmo IDW vs Visualización en ArcView	55
5.2.	Variación de la contaminación en el tiempo.	57
5.3.	Variación del radio para el algoritmo IDW2.....	64
5.4.	Variación de la potencia para el algoritmo IDW.....	66
5.5.	Variación del tipo de monitores	68
6.	Conclusiones	71
7.	Referencias.....	72

1. Introducción

En este capítulo se introduce el trabajo de grado: Prototipo para visualizar la contaminación en el aire de Bogotá. Se describe la problemática, las alternativas de solución propuestas, y el desarrollo del prototipo.

1.1. Problemática

Uno de los principales problemas ambientales de la ciudad de Bogotá es la contaminación en el aire (1) (Ver figura 1).



Figura 1: Contaminación en el aire de Bogotá

Según un artículo del Banco Mundial sobre la contaminación en el aire en los países, se informa que:

“Cada año la contaminación del aire es responsable de la muerte de 1,6 millones de personas - una muerte cada 20 segundos... En muchas zonas urbanas la exposición a la contaminación del aire es la principal amenaza ambiental para la salud humana. A largo plazo la exposición a altos niveles de hollín y pequeñas partículas en el aire contribuye a una amplia gama de

efectos en la salud, entre ellos las enfermedades respiratorias, cáncer de pulmón, y las enfermedades del corazón. La contaminación de partículas, en su propia o en combinación con el dióxido de azufre, conduce a una enorme carga de mala salud” (2).

Por otro lado, la emisión de gases contaminantes es causante del calentamiento global, este calentamiento es causado por el "efecto invernadero" de los gases atmosféricos, principalmente del dióxido de carbono, el metano y el óxido nitroso, que atrapan el calor en la atmósfera (3).

1.2. ¿Qué se está haciendo en Bogotá?

El estudio y el aporte de posibles soluciones a esta problemática la manejan diferentes entidades estatales. En el caso de la ciudad de Bogotá existe una entidad encargada de esta labor: la Secretaría Distrital de Ambiente (SDA), que maneja esta problemática a través de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB).

La RMCAB cuenta con 15 estaciones ubicadas en puntos estratégicos de la ciudad que monitorean las concentraciones de material particulado (PM10, PM2.5, PST), de gases contaminantes (SO₂, NO₂, CO, O₃) y los parámetros meteorológicos de precipitaciones, vientos, temperatura, radiación solar y humedad relativa (4).

Para visualizar la contaminación en el aire se usan comúnmente los datos de PM10, que son concentraciones de partículas de tamaño inferior a 10 micras, en g de partículas / m³ de aire (5).

Actualmente la RMCAB utiliza la herramienta de Software llamada ArcView para representar gráficamente la contaminación en el aire de la ciudad.

La figura 2 muestra un ejemplo de estas representaciones. En ésta, se puede observar el mapa de Bogotá y la contaminación en el aire. Las estaciones de medición están representadas con triángulos negros, de donde provienen los datos puntuales, de esta forma por medio de un modelo de interpolaciones se realiza la visualización usando una escala de colores. Los colores claros indican menor cantidad de contaminación y los colores fuertes una mayor concentración.

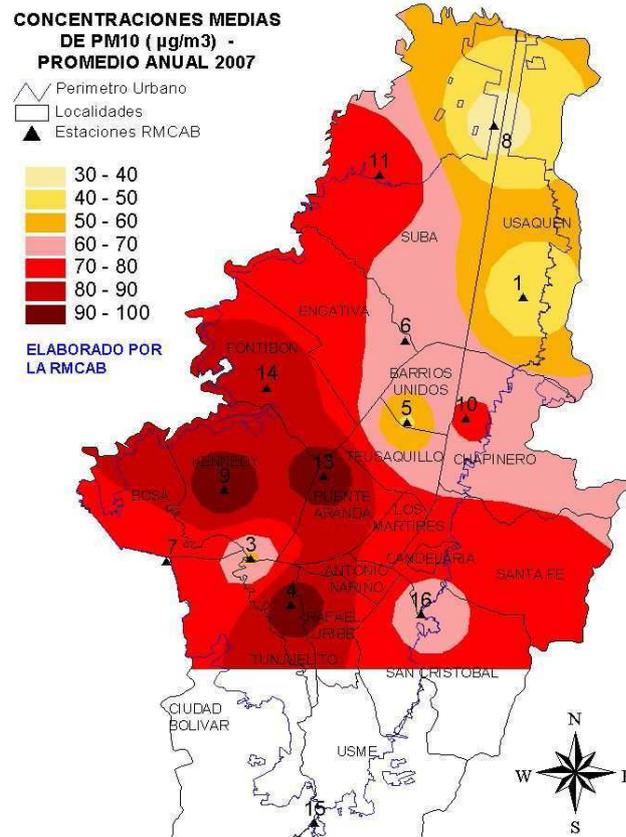


Figura 2: Visualización de la contaminación (PM10) hecha por la RMCAB (4)

1.3. Oportunidad

Actualmente existen dos inconvenientes respecto al manejo de los datos recogidos por las estaciones:

- La RMCAB no maneja representaciones gráficas de fechas específicas. Es posible hacer visualizaciones en ArcView, pero esta herramienta no permite realizar representaciones a partir de alguna fecha específica (6).
- En algunos casos, la cantidad de estaciones y la información obtenida no es suficiente para realizar la visualización en todo el mapa de la ciudad (6).

Como se busca realizar una visualización a partir de una fecha dada, se pueden tener en cuenta las estaciones que funcionaron en ese día, y hacer la visualización con base en la información disponible.

Al analizar esta situación se propuso desarrollar un prototipo que realice la visualización gráfica de la contaminación en el aire de Bogotá dada una fecha específica y que tenga en cuenta las condiciones de las estaciones que funcionaron en esa fecha, es decir, que si existe muy poca información para hacer la representación, se use un modelo de visualización alternativo.

1.4. Formulación

¿Cómo visualizar la contaminación en el aire de Bogotá a partir una fecha particular y que la información gráfica presentada sea confiable?

1.5. Justificación

La SDA actualmente cuenta con un sistema de visualización de la contaminación en el aire de la ciudad, manejado por la herramienta de Software *ArcView*. Sin embargo existen tres razones principales que motivan la creación del prototipo:

- a) La importancia de visualizar la contaminación en la ciudad de Bogotá.

Según John Real, quien hace parte del equipo de la RMCAB, las representaciones gráficas de la contaminación en la ciudad son importantes porque a través de estas se pueden interpretar mucho mejor los datos.

Es importante que las personas puedan conocer el estado de la contaminación de la ciudad, ya que el interés por el medio ambiente adquiere cada año una mayor relevancia en el ámbito mundial, nacional y personal (7).

A continuación se describen las ventajas de la visualización para los científicos:

“Los científicos necesitan una alternativa a los números. El uso de imágenes es una realidad técnica hoy en día y mañana será un requisito esencial para el conocimiento. La capacidad de los científicos para visualizar los cálculos y simulaciones complejas es absolutamente esencial para garantizar la integridad de los análisis, a fin de promover el escrutinio en profundidad y para comunicar el resultado de tal examen a los demás... El propósito de cálculo científico está buscando, no enumerar. Se estima que el 50% de las neuronas del

cerebro están asociadas con la visión. La visualización en un cálculo científico tiene como objetivo poner esta maquinaria neurológica a trabajar” (8).

Por otro lado, el uso de las visualizaciones es muy útil y oportuno para los estudios ambientales y meteorológicos.

- b) El número de estaciones de monitoreo no es suficiente para mostrar la información de la contaminación de toda la ciudad.

Como se presenta en la sección 2, la RMCAB cuenta con 15 estaciones de monitoreo que se encargan de realizar la medición de varios contaminantes en el aire.

A pesar de la ubicación estratégica de las estaciones, no todas analizan la totalidad de los contaminantes. Por esta razón, en algunos casos no existe la suficiente información para visualizar algún tipo de contaminante en toda la ciudad.

Por otro lado, algunas estaciones no funcionan ciertos días, por lo tanto, el número de datos disponibles para hacer una visualización disminuye. Esto hace que la calidad de la representación gráfica se reduzca.

- c) Los índices de la contaminación atmosférica fluctúan muy rápido en el tiempo.

Este aspecto es importante porque se debe tener en cuenta un seguimiento de la variación de la contaminación respecto al tiempo.

“El tiempo, en el sentido de las condiciones meteorológicas, es difícil de definir; es la suma total de diversos estímulos atmosféricos a los que están sometidos las personas, las plantas y los objetos inanimados. Resulta fácil medir sus distintos elementos –temperatura, humedad, viento, nubosidad, precipitación, visibilidad, presión atmosférica y radiación, etc.- pero es difícil encontrar un índice combinado que integre todos estos factores en una sola escala. A esto se agrega el hecho de que dichos elementos fluctúan de un día a otro, incluso segundo a segundo, y que los valores medios y sus desviaciones típicas con frecuencia disimulan las tendencias a corto plazo o los valores extremos que pueden tener enorme importancia para la respuesta de los receptores” (9).

1.6. Objetivo general

Desarrollar un prototipo que permita visualizar la contaminación en el aire de Bogotá a partir de fechas consignadas en el registro histórico de datos que tiene la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá de la Secretaría Distrital de Ambiente.

1.7. Objetivos específicos

- Realizar un levantamiento de información sobre el comportamiento físico y visualización de la contaminación en el aire.
- Explorar herramientas de desarrollo de software y seleccionar la más adecuada para realizar el algoritmo.
- Desarrollar un algoritmo de visualización de partículas a partir de datos suministrados en puntos concretos (estaciones).
- Desarrollar un prototipo que ejecute la visualización de partículas con datos de entrada procedentes de la búsqueda de información a partir de una fecha particular.
- Definir y ejecutar un plan de pruebas para realizar una validación de los resultados obtenidos.

2. Marco Teórico

En este capítulo se dan a conocer las definiciones importantes para el proyecto, los conceptos técnicos referentes a la visualización de partículas, además, se presenta el contexto que permitirá desarrollar el trabajo.

2.1. Instituciones

Hay instituciones que se encargan de gestionar los recursos ambientales para la preservación y el aprovechamiento sostenible, a continuación se describen la Secretaría Distrital de Ambiente, la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá y la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos.

2.1.1. Secretaría Distrital de Ambiente

Las funciones de la Secretaría de Ambiente se definen a continuación:

“La Secretaría Distrital de Ambiente (SDA) es la entidad encargada, en Bogotá, de orientar y liderar la formulación de políticas ambientales y de aprovechamiento sostenible de los recursos ambientales y del suelo, tendientes a preservar la diversidad e integridad del ambiente, el manejo y aprovechamiento sostenible de los recursos naturales distritales y la conservación del sistema de áreas protegidas, para garantizar una relación adecuada entre la población y el entorno ambiental y crear las condiciones que garanticen los derechos fundamentales y colectivos relacionados con el medio ambiente. (Artículo 2, Decreto 561 de 2006)” (10).

2.1.2. Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá

Las funciones de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá se definen a continuación:

“La Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB), es un sistema de monitoreo ambiental continuo, con transmisión de datos vía telefónica (fija y celular). Cuyo objetivo es obtener, procesar y divulgar información de la calidad del aire en el Distrito Capital, de forma confiable y clara, para evaluar el cumplimiento de estándares de calidad del aire en la ciudad y verificar la tendencia de la concentración de los contaminantes, como información base para la definición de políticas de control de contaminación” (4).

En la tabla 1 se presenta la lista de las estaciones con su ubicación.

No.	Nombre	Localidad	Dirección
1	Bosque	Usaquén	Tv 9 No. 133-95
2	MAVDT	Santa Fe	CL 37 No. 8-40
3	Sony	Kennedy	Auto. Sur No. 61-40
4	Tunal	Tunjuelito	Carrera 24 N° 49-86 sur
5	I.D.R.D.	Barrios Unidos	CL 63 No. 47-06
6	Carrefour	Engativá	CL 81 No. 68-50
7	Cazucá	Ciudad Bolívar	CL 14 No. 6-54 Entrada 1 Cazucá
8	Escuela	Suba	Auto. Norte KM 13
9	Kennedy	Kennedy	Carrera 86 No 40-55 sur
10	Sto. Tomás	Chapinero	CR 9 No. 72-90
11	Corpas	Suba	Clínica Corpas Av. Corpas KM. 13
12	Estación Móvil	Santa Fe	Calle 13 con 32 secretaria Distrital de Salud
13	Puente Aranda	Puente Aranda	CR 65 No. 10-95
14	Fontibón	Fontibón	CR 95 No. 24-49
15	Usme	Usme	Carretera a Usme No. 16 - 71
16	Vitelma	San Cristóbal	Calle 9 Sur con 9 Este

Tabla 1: Estaciones de la RMCAB

En la figura 3 se muestra la posición geográfica de las estaciones de monitoreo.

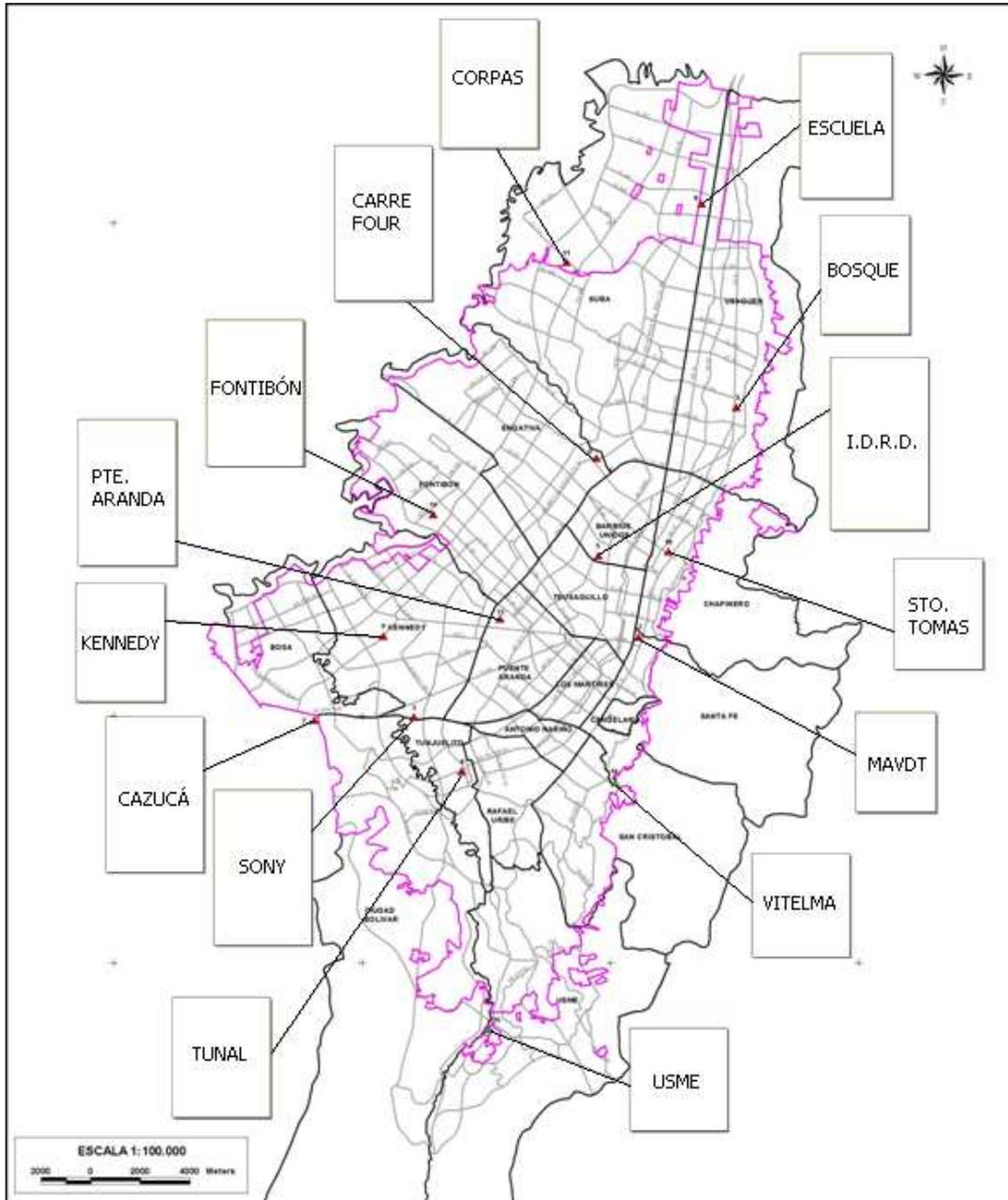


Figura 3: Localización geográfica de la RMCAB (11)

Las estaciones y los tipos de contaminantes que miden se muestran en la tabla 2.

ESTACION	LOCALIDAD	SECTOR	CONTAMINANTES						
			PM10	PST	PM2.5	SO2	NO2	CO	O3
No.1 Bosque	Usaquén	Norte	X						
No.2 MAVDT	Santa Fe	Centro				X	X		X
No.3 Sony	Kennedy	Sur	X	X		X		X	X
No.4 Tunal	Tunjuelito	Sur	X			X			
No.5 I.D.R.D.	Barrios Unidos	Centro	X	X		X	X	X	X
No.6 Carrefour	Engativá	Noroccidente	X			X	X	X	
No.7 Cazucá	Ciudad Bolívar	Suroccidente	X	X		X		X	
No.8 Escuela	Suba	Norte	X						
No.9 Kennedy	Kennedy	Suroccidente	X		X	X			
No.10Sto. Tomás	Chapinero	Centro	X			X			
No. 11 Corpas	Suba	Noroccidente	X				X	X	
No.13Pte Aranda	Puente Aranda	Centroccidente	X			X	X		
No.14 Fontibón	Fontibón	Noroccidente	X			X	X	X	X
No.15 Usme	Usme	Sur							
No. 16Vitelma	San Cristóbal	Sur							

Tabla 2: Estaciones de la RMCAB y los contaminantes monitoreados (4)

2.1.3. Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos

La misión de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA por su siglas en inglés: Environmental Protection Agency) es proteger la salud de los humanos y la del medio ambiente. La EPA dirige las ciencias ambientales de la nación, así como también los esfuerzos investigativos, educativos y de evaluación (12).

Las tareas principales de la EPA son:

- Desarrollo y cumplimiento de las regulaciones ambientales
- Ofrecimiento de ayuda financiera
- Realiza investigaciones ambientales
- Auspicia consorcios y programas voluntarios
- Educación ambiental adicional

2.2. Contexto

A continuación se presenta el contexto donde se desarrolla el proyecto, se describe la ciudad de Bogotá, sus problemas de contaminación y lo que se está haciendo actualmente para la gestión de esta problemática.

2.2.1. Bogotá

Bogotá es la capital de Colombia, esta ciudad presenta las siguientes características geográficas y demográficas:

1. Características Geográficas

Los siguientes datos son tomados de (13).

Bogotá se encuentra posicionado geográficamente en: Latitud Norte: 4° 35'56" y Longitud Oeste de Greenwich: 74°04'51" dentro de la zona de confluencia intertropical. Descansa sobre la extensión noroccidental de la cordillera de Los Andes en una sabana con gran variedad de climas, tipos de suelos, cuerpos de aguas y otras formaciones naturales.

Como Bogotá está ubicada entre montañas, éstas sirven como barrera natural que restringe el flujo de humedad, influyendo en el régimen de lluvias. La temperatura varía de acuerdo con los meses del año, en diciembre, enero y marzo son altas, al contrario de abril y octubre en donde son más bajas. Su altura media está en los 2.600 metros sobre el nivel del mar.

Territorio:

Extensión total: 177.598 hectáreas.

Elevación: 2.630 metros.

Área rural: 129.815 hectáreas

Área urbana: 30.736 hectáreas

Área suburbana: 17.045 hectáreas.

2. Características Demográficas:

Los siguientes datos son tomados de: (13)

Población (según Censo General 2005-DANE): 6.778.691 habitantes

Hogares 1.931.372

Viviendas 1.762.808

2.2.2. Contaminación en Bogotá

La contaminación en el aire de Bogotá, está determinada por la acción de diferentes gases contaminantes, como se describen a continuación:

“El análisis de información suministrado por el DAMA (Departamento Administrativo del Medio Ambiente) en el Seminario Taller sobre Calidad del Aire realizado en febrero de 2001, dejó entre ver que un 65% de las emisiones de gases contaminantes que se arroja a la atmósfera de la ciudad lo genera el sector vehicular, mientras que el restante 35% se lo añaden a fuentes fijas, siendo el monóxido de carbono el gas contaminante generado por fuentes móviles con mayor aporte, presentado un valor del 99.39%, seguido por los óxidos de nitrógeno (NOx) con un valor del 83%; la parte restante, es decir, el 0.61% de aportes de CO y 16,96% de NOx lo generan las fuentes fijas que se ubican en la ciudad” (14).

Las consecuencias de la influencia de estos gases se describen a continuación:

“Lo anterior, trae consecuencias en la salud de los bogotanos ya que la inhalación de dichos gases suele producir enfermedades que atacan los sistemas circulatorio, respiratorio y visual de los habitantes de la ciudad. El Ministerio del Medio Ambiente reveló al Diario del Espectador en la Sección Ambiental del 26 de febrero de 2000, que Bogotá, es la ciudad con el índice de contaminación más alto en Colombia y que el 70% de esta problemática es originada por el Monóxido de Carbono que producen los automóviles, sugiriendo la urgente necesidad de contar con mecanismos de control de este tipo de contaminación” (14).

2.3. Definiciones

A continuación se presentan las definiciones de: Sistema de Información Geográfico, Visualización científica, meteorología y dispersión.

2.3.1. Sistemas de Información Geográficos

Los sistemas de información Geográficos (SIG) integran hardware, software y conjuntos de datos para capturar, gestionar, analizar y presentar información geográfica (15).

2.3.2. Visualización Científica

Se refiere principalmente a la visualización de fenómenos 3D (meteorológicos, médicos, biológicos, etc), donde se hace hincapié en representaciones realistas de los volúmenes, superficies, fuentes de iluminación, entre otras. Algunas cuentan con componentes dinámicos (16).

2.3.3. Meteorología

La meteorología es el estudio científico interdisciplinario de la atmósfera que se centra en los procesos meteorológicos (estado del tiempo, medio atmosférico, los fenómenos allí producidos y las leyes que lo rigen) y en la predicción de estos (17).

2.3.4. Dispersión

El transporte y dispersión de contaminantes del aire ambiental están influenciados por complejos factores. Las variaciones globales y regionales del clima y las condiciones topográficas locales afectan el transporte y dispersión de los contaminantes.

En una escala mundial, las variaciones del clima influyen sobre el movimiento de los contaminantes. En un nivel más local, los principales factores del transporte y dispersión son el viento y la estabilidad.

La velocidad del viento puede afectar en gran medida la concentración de contaminantes en un área. Mientras mayor sea la velocidad del viento, menor será la concentración de contaminantes.

La estabilidad atmosférica hace referencia al movimiento vertical. Las condiciones atmosféricas inestables producen la mezcla vertical. Generalmente, durante el día el aire cerca de la superficie de la tierra es más caliente y liviano que el aire en la atmósfera superior

debido a la absorción de la energía solar. El aire caliente y liviano de la superficie sube y se mezcla con el aire frío y pesado de la atmósfera superior que tiende a bajar. Este movimiento constante del aire crea condiciones inestables y dispersa el aire contaminado.

Otros factores meteorológicos básicos que afectan la concentración de contaminantes en el aire ambiental son la radiación solar, precipitación y humedad.

La radiación solar contribuye a la formación de ozono y contaminantes secundarios en el aire. La humedad y la precipitación también pueden favorecer la aparición de contaminantes secundarios peligrosos, tales como las sustancias responsables de la lluvia ácida. La precipitación puede tener un efecto beneficioso porque lava las partículas contaminantes del aire y ayuda a minimizar las partículas provenientes de actividades como la construcción y algunos procesos industriales (18).

2.3.5. Modelos de dispersión

Los modelos de dispersión son un método para calcular la concentración de contaminantes a nivel del suelo y a diversas distancias de la fuente. En la elaboración de modelos se usan representaciones matemáticas de los factores que afectan la dispersión de contaminantes. Las computadoras, mediante modelos, facilitan la representación de los complejos sistemas que determinan el transporte y dispersión de los contaminantes del aire.

Para hacer un modelo del transporte y dispersión de contaminantes del aire se recopila información específica de un punto de emisión. Esta información incluye la ubicación del punto de emisión (longitud y latitud), la cantidad y tipo de los contaminantes emitidos, y factores meteorológicos tales como la velocidad del viento, perfil de la temperatura ambiental y presión atmosférica. Los científicos usan estos datos como insumo del modelo de computación y para predecir cómo los contaminantes se dispersarán en la atmósfera. Los niveles de concentración pueden calcularse para diversas distancias (18).

2.4. Métodos de Interpolación

La interpolación es la construcción de nuevos puntos, partiendo del conocimiento de un conjunto de puntos dados discretos. En esta sección se presentan diferentes modelos de interpolación que sirven para realizar modelos de dispersión.

2.4.1. Inverse Distance Weighted (IDW)

Este método de interpolación asume que cada punto posee una influencia local que disminuye con la distancia. De esta manera, el método pondera con mayor fuerza a los puntos cercanos a los puntos dados discretos y con menor intensidad sobre aquellos ubicados a mayor distancia.

Este método es apropiado cuando la variable analizada disminuye conforme aumenta la distancia desde cada punto analizado.

Considerando que el IDW es un método de interpolación que utiliza los promedios de los valores de entrada (de allí su nombre Inversed Distance Weighted o de la distancia inversa ponderada) el resultado de los valores de las celdas, jamás superarán los límites máximos y mínimos establecidos en los puntos de entrada del análisis (19).

En la figura 4 se muestra un ejemplo del uso del método en el software ArgGIS.

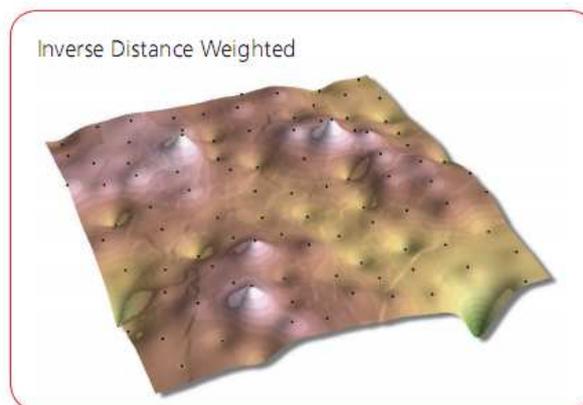


Figura 4: Ejemplo *Inverse Distance Weighted* (20)

2.4.2. Kriging

Está basado en modelos estadísticos que incluyen la autocorrelación (relación estadística entre los valores medidos). Debido a esto, no sólo posee la capacidad de producir una

superficie de predicción, sino que además, proveen algunas herramientas para medir la certeza o precisión de estas predicciones.

Kriging es similar al método IDW en cuanto a ponderar los valores medidos aledaños que servirán para derivar la predicción de las locaciones no medidas en el análisis.

En IDW, la ponderación depende solamente de la distancia hacia la locación a predecir. Sin embargo, en el Kriging, las ponderaciones están basadas no solo en la distancia entre las locaciones medidas y la predicción realizada sino que además se considera la forma en cómo se organiza espacialmente la totalidad de los puntos localizados sobre una superficie (19).

Los valores predecidos son derivados de la medición de las relaciones de los puntos de muestra usando técnicas sofisticadas de ponderación. Los valores generados pueden exceder el valor de los puntos de muestra.

Existen diferentes tipos de Kriging. Kriging ordinario, el método más común, asume que no hay una constante representativa por los datos (tendencia por ejemplo). Kriging universal asume que existe una tendencia en los datos, y puede ser modelado (20).

En la figura 5 se muestra un ejemplo del uso del método en el software ArgGIS.

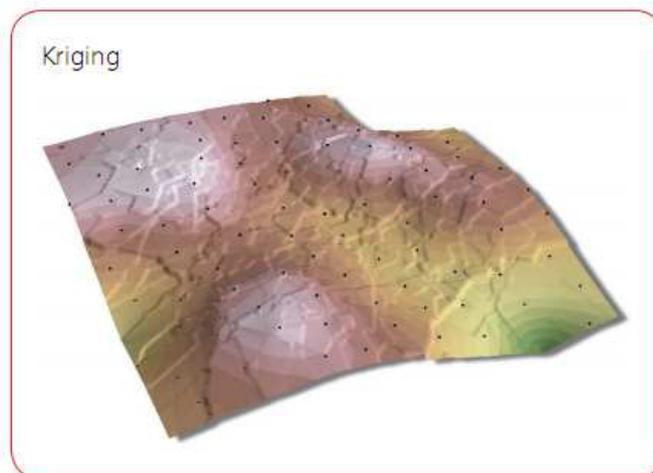


Figura 5: Ejemplo *Kriging* (20)

2.4.3. Natural Neighbor

Al igual que IDW, este tipo de interpolación utiliza un método de ponderación promediada. Sin embargo, en vez de generar un valor de interpolación basado en el promedio ponderado de sus distancias, la interpolación de tipo Natural Neighbor (“cercanía” o “proximidad natural”) genera una triangulación de Delauney a partir de las locaciones medidas y selecciona los nodos más cercanos para crear polígonos o escudos convexos alrededor de las locaciones que los conforman. Luego, pondera sus valores en base a un área proporcionada. En la figura 6 se muestra un ejemplo de vecindades generadas.

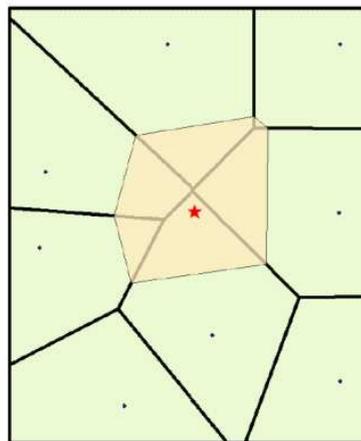


Figura 6: Vecindades Ejemplo *Natural Neighbor* (19)

Este método es el más adecuado cuando los valores se encuentran distribuidos de manera desigual. Es una técnica de interpolación muy adecuada para propósitos genéricos y posee la ventaja de no tener parámetros específicos y complejos como radio, cercanía u otros (19).

Generalmente funciona bien con conjuntos de puntos esparcidos. La ecuación básica de la interpolación es la misma que se usa en la interpolación IDW. Este método puede manejar de manera eficiente grandes cantidades de puntos de entrada. Cuando se usa este método, las coordenadas locales definen la cantidad de influencia que cualquier punto esparcido va a tener en los valores de salida (20).

En la figura 7 se muestra un ejemplo del uso del método en el software ArgGIS.

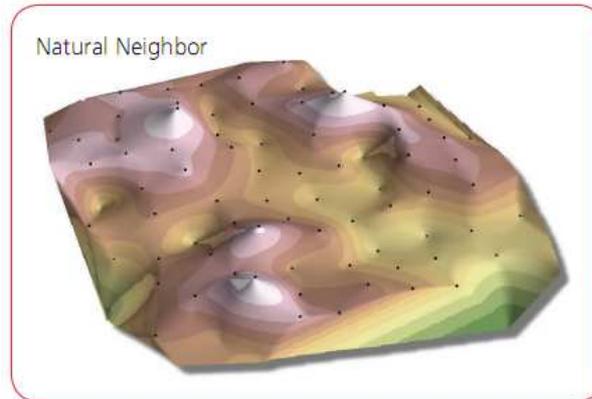


Figura 7: Ejemplo *Natural Neighbor* (20)

2.4.4.Spline

Spline estima valores usando una función matemática que minimiza la superficie global de curvatura. Este resulta en una superficie suave que pasa exactamente a través de los puntos de entrada. Conceptualmente, es como atar una banda de caucho a través de los puntos mientras se minimiza la curvatura total de la superficie. Este puede predecir crestas y valles en los datos y es el mejor método para representar la suave variación de las superficies en fenómenos como la temperatura.

Existen dos clases de spline – regularizada y tensionada - . Un spline regularizado incorpora la primera derivada (pendiente), segunda derivada (taza de variación de la pendiente), y tercera derivada (taza de variación de la segunda derivada) hacia sus cálculos de minimización. Aunque un spline de tensión usa solo las primeras y segundas derivadas, este incluye más puntos en los cálculos, lo cual crea usualmente superficies más suaves, pero toma mayor tiempo de computo.

Es adecuado para mostrar variaciones graduales de superficies como por ejemplo elevaciones o concentraciones de polución. Sin embargo puede no ser útil cuando existen una gran cantidad de variaciones en una distancia horizontal relativamente pequeña (20).

En la figura 8 se muestra un ejemplo del uso del método en el software ArgGIS.

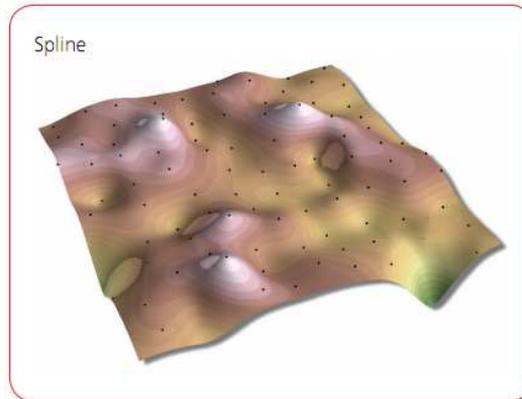


Figura 8: Ejemplo *Spline* (20)

2.4.5. Trend

Trend es un método estadístico que encuentra la superficie que encaja en los puntos de muestra usando un ajuste de regresión del menor cuadrado. Este ajusta una ecuación polinomial a la superficie entera. Esto resulta en una superficie que minimiza las variaciones de la superficie respecto a los valores de entrada. La superficie es construida para que cada punto de entrada, el total de diferencias entre los valores actuales y los estimados (ejemplo, varianza) sean tan pequeños como sea posible. Este es un interpolador inexacto, y la superficie resultante rara vez pasa a través de los puntos de entrada. Sin embargo, este método detecta tendencias en los puntos de muestra y es similar a los fenómenos naturales que típicamente varían suavemente (20).

En la figura 9 se muestra un ejemplo del uso del método en el software ArgGIS.

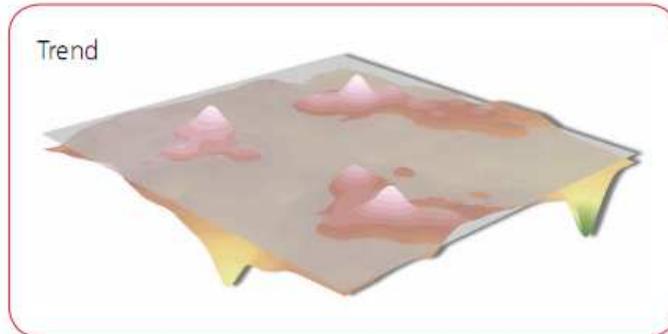


Figura 9: Ejemplo *Trend* (20)

2.4.6. PointInterp

Este método es similar a IDW, la función PointInterp permite mayor control sobre las vecindades de muestra. La influencia de una muestra particular en los valores de la grilla de interpolación, depende de la ubicación en la vecindad y de la cercanía a la celda de interpolación. Los puntos afuera de la vecindad no tienen influencia (20).

En la figura 10 se muestra un ejemplo del uso del método en el software ArgGIS.

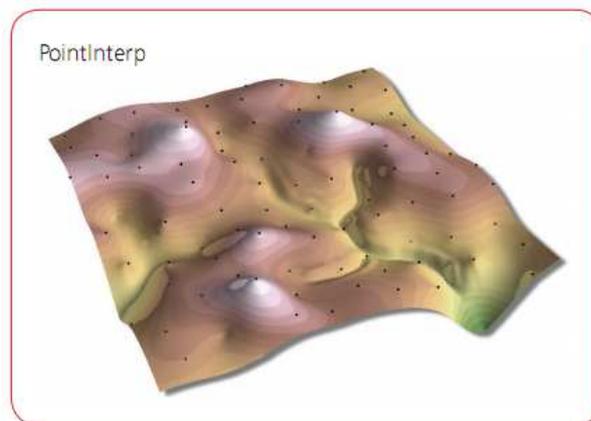


Figura 10: Ejemplo *PointInterp* (20)

2.5. Contaminantes

En esta sección se describen los tipos de contaminante que se utilizan en el prototipo para hacer las representaciones gráficas.

2.5.1. Material particulado menor a 10 micras (PM 10)

Las PM10 son aquellas partículas sólidas o líquidas de polvo, cenizas, hollín, partículas metálicas, cemento ó polen, dispersas en la atmósfera, y cuyo diámetro es menor a 10 μm (1 micrómetro corresponde a la milésima parte de 1 milímetro). Están formadas principalmente por compuestos inorgánicos como silicatos y aluminatos, metales pesados entre otros, y material orgánico asociado a partículas de carbono (hollín). Se caracterizan por poseer un pH básico debido a la combustión no controlada de materiales (21).

Entre las fuentes de emisión de estas partículas se encuentran el polvo, la arena en las calles, las emisiones o escapes de vehículos, operaciones de triturado y pulverización, quema de madera, entre otros.

El polvo representa un 77.9% del total de las fuentes, seguido por la industria, la construcción y el comercio con el 7.6% y el transporte rodado con un 6.5%.

Según el SIMAT (Sistema Monitoreo Atmosférico de la ciudad de México) las PM10 pueden afectar la salud ya que al no ser retenidas por las vías respiratorias superiores, un tercio de éstas penetra hasta los pulmones, ocasionando irritación en las vías respiratorias o agravando enfermedades como el asma o cardiovasculares.

La concentración de estas partículas afecta de varias formas el medio ambiente como la pérdida de visibilidad en el ambiente, las alteraciones del clima, la corrosión de edificios y monumentos y la contribución a la formación de la lluvia ácida.

2.5.2. Ozono (O₃)

Los oxidantes fotoquímicos se forman a través de una serie de reacciones químicas catalizadas por la radiación solar. De éstos el ozono es el compuesto más abundante en las atmósferas urbanas. El ozono es un gas altamente reactivo de color azul pálido, constituido por tres átomos de oxígeno en su estructura molecular.

Los efectos del O₃ han originado una gran preocupación en la actualidad, ya que es uno de los mayores contaminantes, es altamente oxidante y afecta la salud humana. Las personas que viven en lugares con alta concentración de ozono pueden presentar síntomas como: irritación de ojos, nariz y garganta, tos y dificultad durante la respiración profunda, malestar general y dolor de cabeza.

El ozono también afecta a los materiales y el ambiente. Produce oxidación de los metales y envejecimiento prematuro de los materiales. Además de esto puede causar daños en las plantas reduciendo su crecimiento (22).

2.5.3. Monóxido de Carbono (CO)

El Monóxido de Carbono es un gas incoloro, inodoro e insípido, además es muy venenoso. Éste es el más abundante y más distribuido de todos los contaminantes del aire. Representa un subproducto de la combustión incompleta.

Entre las principales fuentes de contaminación de CO se encuentran: los objetos con motores (automóviles, autobuses, trenes, podadoras de césped, entre otros), plantas eléctricas que utilizan carbón, gas o petróleo. El CO también puede provenir del humo y los aparatos de calefacción.

Cuando una persona respira Monóxido de carbono, la hemoglobina (molécula que transporta el oxígeno a diferentes partes del cuerpo) transporta el CO en lugar del oxígeno. Es decir, la hemoglobina transporta menos oxígeno al cuerpo. El cerebro y el corazón necesitan altos niveles de oxígeno. Cuando no reciben el oxígeno necesario no pueden funcionar normalmente (23).

2.5.4. Partículas suspendidas totales (PST)

Las PST es el indicador utilizado para evaluar la concentración de partículas en la atmósfera. Estas partículas están constituidas por diversas sustancias de origen natural o sustancias provenientes del proceso de combustión, como por ejemplo, partículas atomizadas y cenizas del combustible. Por su parte, las partículas de origen natural se componen principalmente de suelos y ocasionalmente por partículas de origen biológico. Estas partículas son dispersas y depositadas en la superficie de acuerdo con sus propiedades de sedimentación. Su

participación en los procesos fotoquímicos no es relevante, sin embargo, representan el agente antropogénico más relevante en la disminución de la visibilidad.

Entre algunas de las PST se encuentran: Las partículas menores a 10 micrómetros (PM10), las partículas menores a 2.5 micrómetros (PM 2.5) y las partículas aerobiológicas (24).

2.5.5. Dióxido de Azufre (SO₂)

El dióxido de azufre es un gas incoloro de olor característico, constituido por un átomo de azufre y dos átomos de oxígeno en su estructura molecular. El dióxido de azufre se origina por la combustión de compuestos que contienen azufre como el diesel y el combustóleo. También se puede originar por la fundición de materiales ricos en sulfato. La permanencia media del SO₂ en la atmósfera depende de la rapidez con la cual se convierta en ácido sulfúrico (H₂SO₄), estas partículas de ácido sulfúrico se dispersan en el ambiente en forma de lluvia, nieve, niebla dando origen al proceso de acidificación de la tierra y del agua. El (H₂SO₄) es uno de los componentes de la lluvia ácida.

El SO₂ puede afectar al sistema respiratorio y la función pulmonar, también produce irritación ocular. Es causante además de enfermedades respiratorias como bronco constricción, bronquitis y traqueítis. Los grupos de la población más sensibles al dióxido de azufre incluye a los niños y ancianos, a los asmáticos y a aquellos con enfermedades pulmonares crónicas como bronquitis y enfisema (25).

2.5.6.Lluvia ácida

La lluvia ácida es una de las consecuencias de la contaminación del aire, se identifica cuando el PH (potencial de los iones de hidrógeno [H⁺] contenidos en una solución) es inferior a 5.6 unidades. El PH se mide en una escala de 0 a 14, siendo el 0 el más ácido y el 14 el más alcalino. En regiones sin contaminación, el agua lluvia alcanza un PH de 5.6 unidades, la lluvia siempre es ligeramente ácida, debido a la formación de ácido carbónico (compuesto de dióxido de carbono (CO₂) y humedad (H₂O)). Sin embargo, esta acidez se considera normal y no daña el ambiente.

“El fenómeno de lluvia ácida, definido técnicamente como depósito húmedo, se presenta cuando el dióxido de azufre (SO₂) y los óxidos de nitrógeno (NO_x) reaccionan con la

humedad de la atmósfera y propician la formación de ácido sulfúrico (H_2SO_4) y ácido nítrico (HNO_3), respectivamente. Estos ácidos fuertes que dan el carácter ácido a la lluvia, nieve, niebla o rocío, se miden en las muestras de agua recolectadas en forma de iones sulfatos (SO_4^{2-}) y nitratos (NO_3^-), respectivamente. Otros elementos que propician este fenómeno son: cloro, amoníaco, compuestos orgánicos volátiles y partículas alcalinas” (26).

La lluvia ácida tiene grandes efectos sobre el ecosistema, ocasiona trastornos importantes en la vida acuática, como la desaparición de microorganismos imprescindibles para el mantenimiento de los ecosistemas acuáticos. También tiene efectos sobre los suelos, altera los ciclos y el balance de los nutrientes, lo que ocasiona pérdida de vegetación y erosión.

Los materiales también son afectados, las construcciones históricas hechas de piedra caliza sufren daños, la piedra al entrar en contacto con la lluvia ácida se transforma en yeso, el yeso se disuelve en agua con mucha facilidad. La lluvia ácida acelera también la corrosión de los materiales de construcción y pinturas.

2.5.7. Dióxido de Nitrógeno (NO_2)

El dióxido de nitrógeno es un gas irritante, oxidante, soluble en agua, de color café rojizo. “La mayoría de los óxidos de nitrógeno (NO_x) generados por el hombre se producen por la oxidación de nitrógeno atmosférico presente en los procesos de combustión a altas temperaturas. El contaminante generado en forma primaria es el NO , parte del cual rápidamente se oxida a NO_2 . Ambos óxidos, liberados a la atmósfera, participan activamente en un conjunto de reacciones fotoquímicas que, en presencia de hidrocarburos reactivos, generan ozono (O_3)” (27).

El NO_2 al disociarse en presencia de luz solar, se transforma en NO y O , el oxígeno atómico (O) reacciona con el oxígeno molecular del ambiente, produciendo O_3 , un alto contaminante de la atmósfera. Por otro lado el NO_2 reacciona con el radical OH lo que produce partículas de ácido nítrico HNO_3 , unos de los componentes de la lluvia ácida.

Este contaminante produce efectos respiratorios en la salud humana, puede irritar los pulmones, causar bronquitis y pulmonía.

2.6. Software

En esta sección se describe el software utilizado para el desarrollo del prototipo.

2.6.1. Java

Java es un lenguaje de programación orientado a objetos de distribución gratuita, desarrollado por la empresa *Sun Microsystems*.

Esta herramienta permite interactuar con servicios externos como las base de datos e integrar las funcionalidades de OpenGL, mediante las librerías de JOGL

Debido a la JVM (Maquina virtual Java) las aplicaciones de Java se pueden ejecutar en diferentes sistemas operativos, pero este mismo sistema hace que el rendimiento disminuya.

2.6.2. JOGL

JOGL es una librería que permite acceder a las funcionalidades de OpenGL mediante el lenguaje de programación Java.

OpenGL (Open Graphics Library) es una especificación estándar que define unas interfaces multilinguaje y multiplataforma para el desarrollo de aplicaciones interactivas para gráficos por computador en 2D y 3D.

OpenGL fomenta la innovación y la velocidad del desarrollo de aplicaciones mediante la incorporación de un amplio conjunto de presentación, mapeo de texturas, efectos especiales, y otras potentes funciones de visualización. Los desarrolladores pueden aprovechar la potencia de OpenGL a través de todas las populares plataformas de escritorio y de trabajo, debido a que su API (Interfaz de aplicaciones de programación) permite que las aplicaciones se puedan desarrollar en una gran variedad de plataformas de computación (28).

2.6.3. ArcView

Arcview es un producto del conjunto de sistemas de información geográficos (SIG) llamado ArcGIS producido y comercializado por la empresa ESRI. Estas aplicaciones ofrecen un conjunto de herramientas y soluciones para el tratamiento de la información geográfica.

ArcView permite visualizar, gestionar, crear y analizar datos geográficos. Este sistema ayuda a entender el contexto geográfico de los datos. Además, permite observar patrones y relaciones entre estos (29).

2.6.4.Oracle XE

Oracle XE que es un sistema de gestión de bases de datos relacional (RDBMS) de la empresa Oracle, este sistema es de distribución gratuita (30).

3. Desarrollo Conceptual

En este capítulo se explican las teorías y conceptos importantes para el desarrollo del producto de software.

3.1. Algoritmos IDW e IDW2

Los algoritmos IDW e IDW2 son una adaptación del método de interpolación multivariada: *Inverse Distance Weighted*. Este método estima valores a puntos en el espacio a partir de un conjunto de puntos de muestra en la región de cada punto procesado.

En la figura 11, se muestra un ejemplo del método, donde los valores de muestra (números negros), calculan un valor estimado (número rojo).

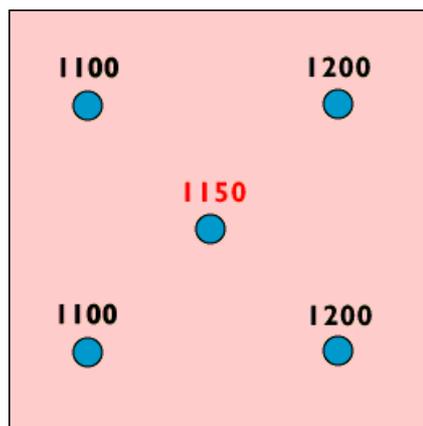


Figura 11: Ejemplo de un método de interpolación

El método asume que el valor de la variable que está siendo procesada disminuye a medida que la distancia hacia el punto de muestra aumenta (31).

También cuenta con una variable llamada potencia (número real positivo), ésta permite controlar la importancia que tienen los puntos conocidos en los que son procesados, a partir de su distancia. Al definir una potencia mayor, se hace más énfasis en los puntos cercanos. A medida que la potencia incrementa, los valores interpolados empezaran a acercarse al valor del punto de muestra más cercano. Al especificar una potencia menor, se da más influencia a

los puntos lejanos. Una potencia de valor 2 es la más utilizada, y es la que se maneja por defecto. Debido a que el método no está vinculado a algún proceso físico real, no hay forma para determinar si un valor de potencia es muy grande. Como guía general, una potencia de 30 se podría considerar extremadamente grande y el uso de ésta es cuestionable.

Este método está basado principalmente en el inverso de la distancia elevado la potencia. Si las distancias son muy grandes, o el parámetro de potencia es muy grande, los resultados pueden ser incorrectos.

3.2. Fórmula matemática Inverse Distance Weighted

A continuación se explica con detalle la fórmula matemática del método *Inverse Distance Weighted*. Tomado de (32).

La forma más simple es el método Shepard. La ecuación es la siguiente:

$$F(x, y) = \sum_{i=1}^n W_i f_i$$

Donde n es el número de puntos de muestra en el conjunto, f_i son los valores de muestra de los puntos conocidos, y W_i es la función para asignar un peso por cada punto de muestra.

La forma clásica de la ecuación de peso W_i es:

$$W_i = \frac{h_i^{-p}}{\sum_{j=1}^n h_j^{-p}}$$

Donde p es un número real positivo llamado: parámetro de potencia (típicamente p=2), mayores valores de p asignan mayor peso a los puntos esparcidos que se encuentran cercanos a los puntos de muestra; h_i es la distancia del punto estimado al punto de muestra:

$$h_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}$$

(x, y) son las coordenadas del punto que se quiere calcular y (x_i, y_i) son las coordenadas para cada punto de muestra.

3.3. Justificación del uso del método *Inverse Distance Weighted*

El método *Inverse Distance Weighted* se apoya en el concepto de continuidad espacial, con valores más parecidos para posiciones cercanas que se van diferenciando conforme se incrementa la distancia. Cada valor, que tiene una correspondencia con un punto determinado, influye sobre los demás de forma local y disminuye proporcionalmente su efecto con la distancia. (33)

Este método puede ser utilizado para realizar un modelo de dispersión de la contaminación atmosférica, a partir de la concentración de la contaminación en determinados puntos en el espacio. Es importante tener en cuenta que esta dispersión está influenciada por diversos factores como el viento, la temperatura, las condiciones climáticas y topográficas entre otras; y que esta dispersión fluctúa muy rápido en el tiempo. Sin embargo, el método *Inverse Distance Weighted* se adapta al hecho de que la concentración de la contaminación disminuye conforme la distancia a los puntos de emisión aumenta, pero es necesario observar que este método no tiene en cuenta parámetros importantes como la velocidad del viento o las condiciones topográficas, entre otros. (18)

El uso de este algoritmo ha sido ampliamente empleado en la representación de variables con continuidad espacial. Es simple y flexible y visualmente presenta muy buenos resultados.

Existen 2 razones principales para el uso del método en el prototipo:

- a) Representar la contaminación en un determinado momento, a partir de una fecha específica.

El prototipo va a permitir observar el comportamiento de la contaminación respecto al tiempo a partir de consultas de fechas horarias o diarias. Los datos provienen del registro histórico de la Secretaría Distrital de Ambiente. Esto quiere decir que el prototipo no va a realizar predicciones ni estadísticas. Por lo tanto se descartan modelos de interpolación predictivos como *Kriging* o *Trend*.

b) El prototipo tiene que ser eficiente.

El prototipo tiene que ser eficiente para mostrar los resultados que se generan a partir de las consultas y así observar rápidamente los cambios de la contaminación en el aire. El método IDW es conveniente porque es simple y no ejecuta cálculos complejos como los modelos *Natural Neighbor* o *Spline*.

3.4. Algoritmo IDW

El algoritmo IDW usa el método *Inverse Distance Weighted*, para representar valores en el espacio especificado teniendo en cuenta todos los puntos de muestra. Por cada valor estimado asigna un color. Las figuras 12 y 13 muestran un ejemplo del uso del algoritmo.

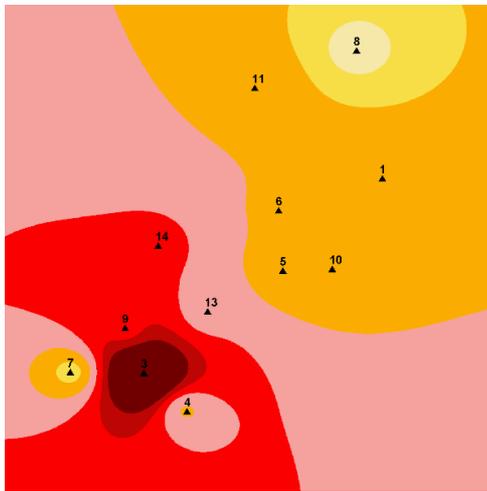


Figura 12: Ejemplo algoritmo IDW, potencia 2

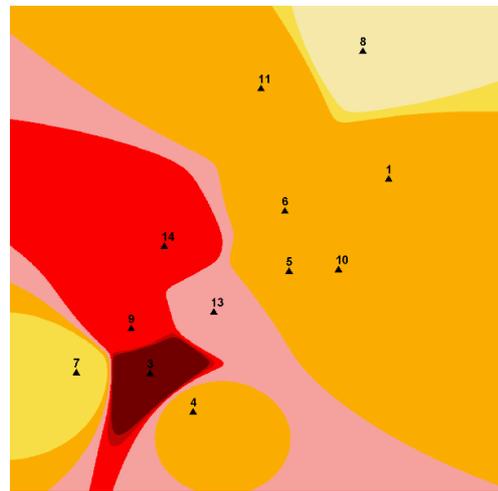


Figura 13: Ejemplo algoritmo IDW, potencia 10

3.5. Algoritmo IDW2

El algoritmo IDW2 es una adaptación del algoritmo IDW. IDW2 usa un agrupamiento de regiones a partir de las distancias entre los puntos de muestra. Estas regiones se conectan si los rangos de estos puntos se interceptan. El conjunto de valores de muestra queda determinado por las regiones de agrupamiento.

IDW2 usa un parámetro de entrada llamada radio que determina un rango de validez para cada punto de muestra. En la figura 14 se usa el algoritmo IDW2 con un radio de 2.5 y en la figura 15 se amplía el radio a 4.3, donde se resalta el agrupamiento de 7 regiones.

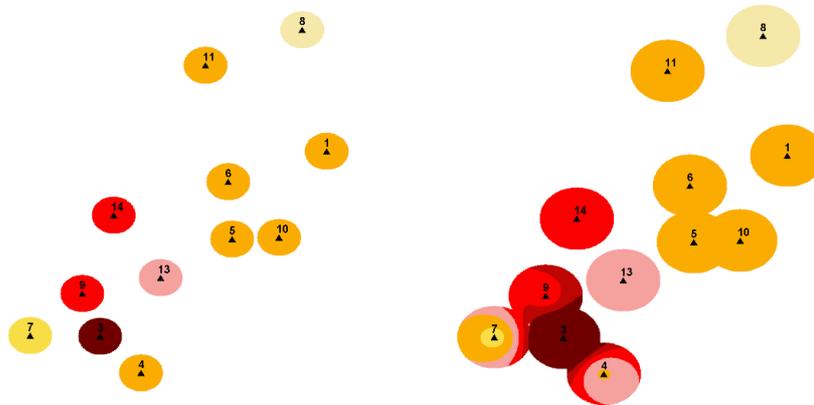


Figura 14: Ejemplo algoritmo IDW2, potencia 2, radio 2.5 Figura 15: Algoritmo IDW2, potencia 2, radio 4.3

El algoritmo IDW2 se desarrollo debido a la necesidad de tener en cuenta las distancias entre las estaciones para establecer rangos de validez, es decir que para las estaciones que están muy lejos no se tendrán en cuenta las interacciones de los valores de la contaminación entre éstas. Este algoritmo responde a la justificación presentada en la introducción: El número de estaciones de monitoreo no es suficiente para mostrar la información de la contaminación de toda la ciudad.

4. Desarrollo de Software

Para realizar el prototipo se preparó una estructura que tiene en cuenta la fase investigativa y el desarrollo del software. La figura 16 presenta la estructura del desarrollo del proyecto.



Figura 16: Estructura del Proyecto

La primeras dos fases son investigativas, en ellas se plantearon las bases para el desarrollo del prototipo, así como los métodos y funciones importantes que se iban a tener en cuenta durante el transcurso de su desarrollo.

Posteriormente, y de forma iterativa, se fueron desarrollando el diseño arquitectónico y el diseño detallado. Estos diseños se fueron desarrollando al mismo tiempo que se hacía la implementación con el fin de tener retroalimentación entre el diseño y la parte práctica.

Después de realizar la implementación se pasó a la fase de pruebas y resultados, la cual se presenta en el siguiente capítulo.

4.1. Análisis

Después de haber realizado la investigación mediante entrevistas en la SDA. Y una vez que se tenían los objetivos claros, se definieron los requerimientos del sistema con el cliente. De igual forma este fue un proceso iterativo que se iba mejorando ante las pruebas presentadas en la SDA.

4.1.1. Requerimientos

En esta sección se describen los requerimientos funcionales y no funcionales del prototipo.

4.1.1.1. Requerimientos Funcionales

En la tabla 3 se presentan los requerimientos funcionales del sistema.

No.	Nombre	Descripción
1	Cambiar número de estaciones máxima para mostrar IDW	La aplicación debe permitir establecer el número máximo de estaciones necesarias para usar el algoritmo IDW
2	Cambiar potencia para IDW	La aplicación debe permitir cambiar el parámetro de potencia para las visualizaciones que están hechas con el algoritmo IDW
3	Cambiar potencia para IDW2	La aplicación debe permitir cambiar el parámetro de potencia para las visualizaciones que están hechas con el algoritmo IDW2
4	Cambiar radio para IDW2	La aplicación debe permitir cambiar el radio de influencia para las estaciones que están siendo visualizadas por IDW2
5	Cargar datos desde archivo	El programa debe facilitar la carga de datos desde un archivo que tenga la siguiente información: Monitor Fecha Conjunto de estaciones y valores
6	Guardar Imagen	El sistema debe permitir guardar las imágenes de los resultados visualizados
7	Hacer recorrido entre horas	El sistema debe tener opciones para retroceder o avanzar una hora, en consultas de tipo horario
8	Mostrar descripción	El sistema debe mostrar la descripción de los colores, indicando su impacto para las personas, éstas deben ser tomadas del estándar EPA
9	Mostrar escala	El sistema debe mostrar la escala donde se pueda ver la descripción de los colores usados al visualizar.
10	Mostrar estaciones	El programa debe mostrar una tabla con la identificación, nombre y valor de las estaciones que están siendo visualizadas
11	Seleccionar fecha	El sistema debe permitir seleccionar la fecha para consultas diarias
12	Seleccionar fecha y hora	El sistema debe permitir seleccionar la fecha y hora para

		consultas horarias
13	Seleccionar monitor	El sistema debe permitir seleccionar el monitor para las consultas horarias y diarias.
14	Usar algoritmo IDW	La aplicación debe permitir el uso del algoritmo IDW para hacer las visualizaciones
15	Usar algoritmo IDW2	La aplicación debe permitir el uso del algoritmo IDW para hacer las visualizaciones
16	Visualizar datos de forma diaria	El sistema debe visualizar la información de los datos almacenados de forma diaria en las estaciones de la RMCAB.
17	Visualizar datos de forma horaria	El sistema debe visualizar la información de los datos almacenados de forma horaria en las estaciones de la RMCAB.
18	Hacer recorrido entre días	El sistema debe tener opciones para retroceder o avanzar un día, en consultas de tipo diario

Tabla 3: Requerimientos Funcionales

4.1.1.2. Requerimientos No Funcionales

En la tabla 4 se presentan los requerimientos no funcionales del sistema.

No.	Nombre	Descripción
1	El sistema debe cargar los datos de manera exacta	El sistema debe cargar los datos tal y como están almacenados en la base de datos
2	Ayuda para el usuario	El sistema debe contar con un manual de usuario
3	El sistema debe ser eficiente	Al realizar alguna consulta, el sistema debe mostrar los resultados en menos de 1 minuto.
6	Guía de Instalación	El sistema debe contar con una guía de instalación

Tabla 4: Requerimientos No Funcionales

4.2. Diseño Arquitectónico

En esta sección se presentan los casos de uso del sistema y se describe la arquitectura que se utilizó, la cual está basada en el diseño arquitectónico “Modelo, Vista, Controlador”.

4.2.1. Casos de Uso

En la figura 17 se muestran los casos de uso que describen las funciones generales del sistema.

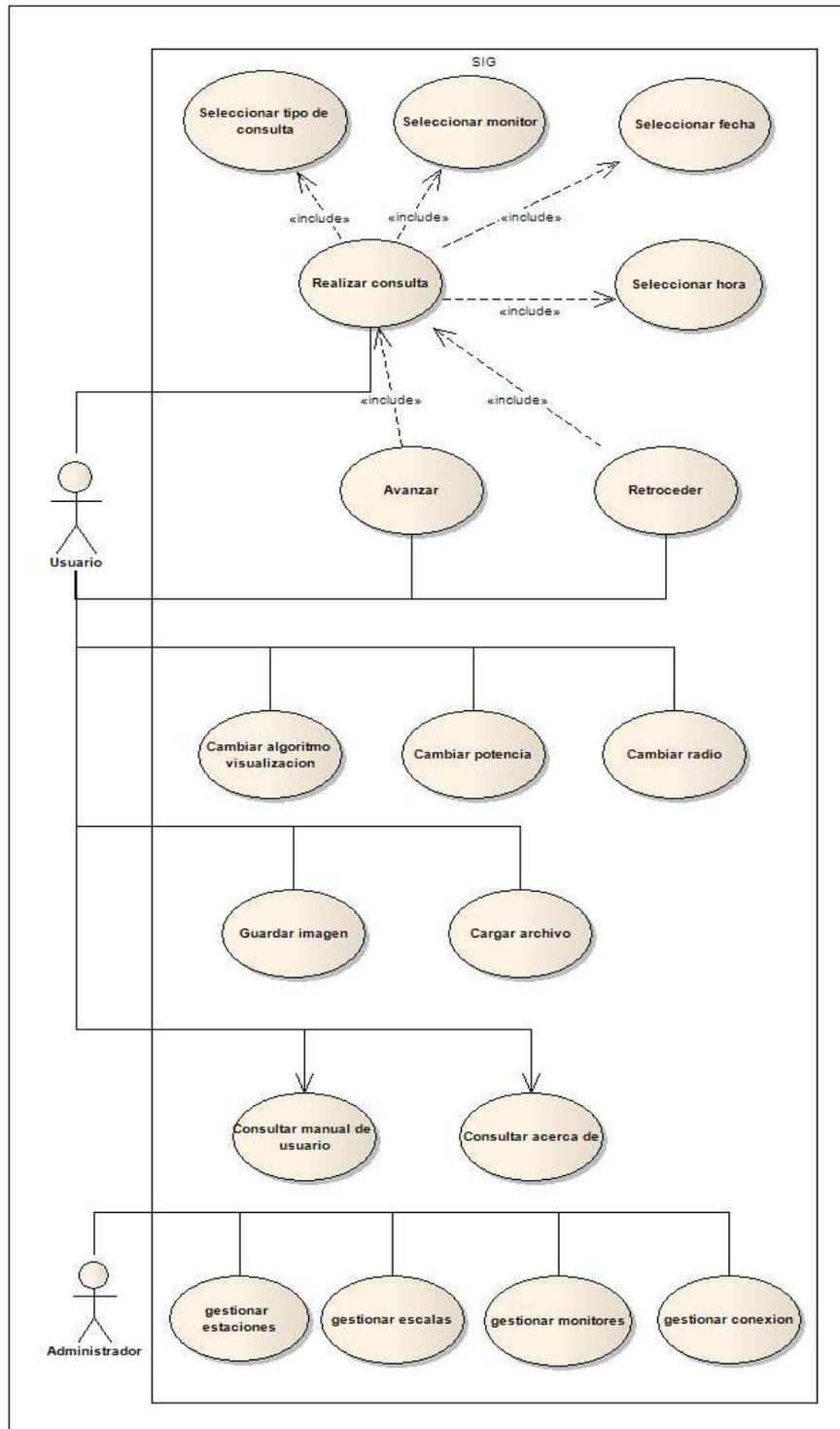


Figura 17: Casos de Uso

4.2.1.1. Actores

En la tabla 5 se describen las funcionalidades de los actores del modelo de casos de uso.

Nombre	Descripción
Usuario	El usuario del sistema representa a las personas que pueden acceder al prototipo para realizar las principales funciones.
Administrador	El administrador del sistema representa a las personas que pueden usar los archivos de configuración, los cuales son importantes para cargar el prototipo.

Tabla 5: Actores

4.2.1.2. Casos de uso

En la tabla 6 se describen los casos de uso del sistema.

No.	Nombre	Descripción
1	Avanzar	Avanza un día o una hora dependiendo del tipo de consulta
2	Cambiar algoritmo visualización	Cambia el tipo de algoritmo de visualización, el cual puede ser IDW o IDW2
3	Cambiar potencia	Cambia la potencia necesitada por el algoritmo de visualización IDW o IDW2
4	Cambiar radio	Cambia el radio de influencia de las estaciones para el algoritmo IDW2
5	Cargar archivo	Carga los datos de entrada a partir de un archivo de texto, para que el sistema haga la visualización
6	Consultar acerca de	Muestra el "acerca de" para mayor información del programa
7	Consultar manual de usuario	Muestra el manual de usuario
8	Guardar imagen	Guarda la imagen de los resultados visualizados
9	Realizar consulta	Realiza la visualización a partir los siguientes datos de entrada: <ul style="list-style-type: none"> • Tipo de consulta • Monitor • Fecha
10	Retroceder	Retroceder un día o una hora dependiendo del tipo de consulta
11	Seleccionar fecha	Escoge una fecha para realizar consultas de tipo horario o diario
12	Seleccionar hora	Escoge la hora para tipos de consulta horarias
13	Seleccionar monitor	Escoge un tipo de monitor, entre los cuales se cuentan: <ul style="list-style-type: none"> • PM10 • PST • O3 • SO2 • NO2 • CO
14	Seleccionar tipo de consulta	Configura la consulta para que sea de tipo diaria u horaria.

15	gestionar conexión	<p>El administrador podrá ingresar los datos necesarios para realizar la conexión a la base de datos.</p> <p>Las entradas son:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Host • Port • SID • Username • Password
16	gestionar escalas	<p>El administrador podrá gestionar las escalas a partir de un archivo de configuración XML</p> <p>Las escalas pueden ser gestionadas para tipos de consulta horario o diario.</p>
17	gestionar estaciones	<p>El administrador podrá gestionar las estaciones a partir de un archivo de configuración.</p> <p>Las funciones que puede hacer son:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Agregar o quitar estaciones. • Dar el nombre de la estación • Seleccionar la posición de las estaciones en forma de latitud y longitud
18	gestionar monitores	<p>El administrador podrá gestionar los monitores a partir de un archivo de configuración XML</p> <p>Las opciones son las siguientes:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Agregar o quitar monitores • Cambiar la unidad de medición • Cambiar el nombre y la descripción del monitor <p>Los monitores pueden ser gestionados para tipos de consulta horario o diario.</p>

Tabla 6: Casos de Uso

4.2.2. Patrón arquitectónico

El prototipo es un sistema interactivo que se modelo a partir del patrón MVC, Modelo – Vista – Controlador (ver figura 18).

MVC divide una aplicación interactiva en tres áreas: el procesamiento, la entrada y la salida. El componente del modelo encapsula la funcionalidad y datos básicos. El modelo es independiente de las representaciones específicas de salida o del comportamiento de entrada. El componente de la vista despliega la información al usuario. Una vista obtiene los datos del modelo. El componente controlador recibe las peticiones, por lo general eventos como el movimiento del ratón, la activación de los botones del ratón o del teclado. Los eventos son traducidos a solicitudes de servicio para el modelo o la vista. El usuario interactúa con el sistema exclusivamente a través de los controladores. Si el usuario cambia el modelo a través

del controlador de una vista, todos los demás puntos de vista o que dependen de estos datos, deberían reflejar los cambios. Las vistas recuperan los datos del modelo y actualizan la información mostrada (34).

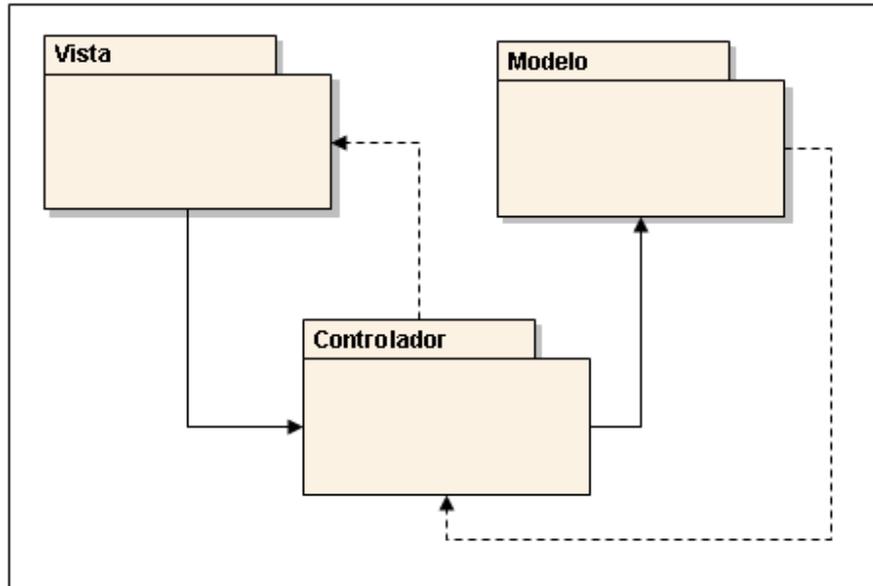


Figura 18: Patrón arquitectónico

Vista: Almacena las clases que generan la interfaz gráfica para la presentación de la información.

Modelo: Maneja la lógica del negocio, y realiza los cálculos de los métodos IDW e IDW2.

Controlador: Tiene las clases que se encargan de escuchar las acciones que hace el usuario.

4.2.3. Vista de datos

La vista de datos que se expone a continuación es la que actualmente utiliza la SDA, para almacenar la información que viene desde las estaciones de monitoreo, por razones de privacidad, sólo se muestran los atributos principales de las tablas utilizadas (ver figura 19).

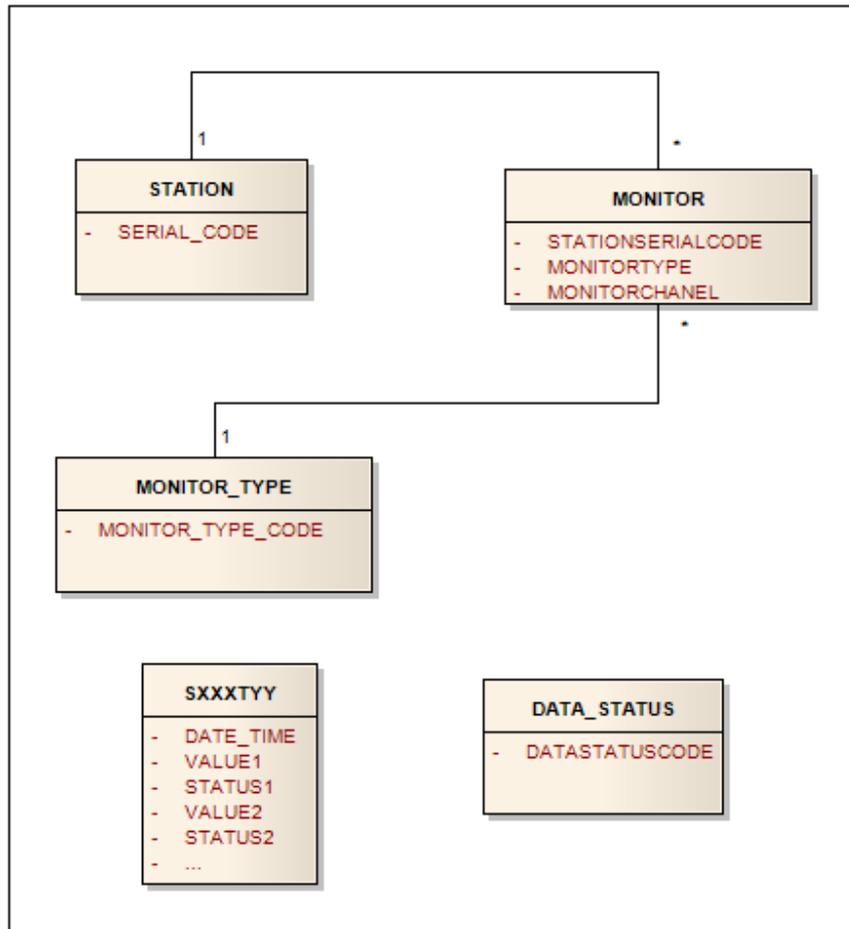


Figura 19: Vista de datos

En la tabla 7 se describen los principales atributos de las tablas utilizadas.

Tabla	Descripción
DATA_STATUS	En esta tabla se almacenan los parámetros para saber si los datos medidos son correctos o no.
MONITOR	Esta tabla relaciona la tabla STATION con la tabla MONITOR_TYPE, para cada par de datos le da una identificación MONITORCHANEL
MONITOR_TYPE	En esta tabla esta la información de los diferentes monitores, entre los que se encuentran: <ul style="list-style-type: none"> • PM10 • PST • NO2

	<ul style="list-style-type: none"> • SO2 • CO • O3 • Lluvia
STATION	<p>Esta tabla tiene toda la información relacionada con las estaciones.</p> <p>Su identificación, su posición geográfica, entre otros.</p>
SXXXTYY	<p>Existen tablas para manejar datos de tipo diario u horario entre otros. Hay varias tablas por cada estación, por ejemplo S001T60 indica que esta almacena los datos horarios para la estación 1 (Bosque).</p> <p>Los datos de esta tabla están determinados por MONITORCHANNEL de la tabla MONITOR, y el estado por DATASTATUSCODE de la tabla DATA_STATUS</p>

Tabla 7: Vista de datos

4.3. Diseño detallado

En esta sección se describen las clases que componen el sistema, a partir del patrón arquitectónico MVC.

4.3.1. Paquete Controlador

Este componente tiene dos clases que se encargan de escuchar los eventos que se ingresan a través de la interfaz gráfica (ver figura 20).

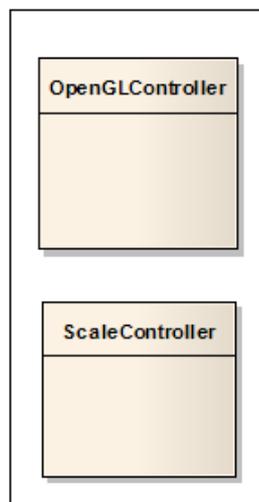


Figura 20: Paquete Controlador

En la tabla 8 se describen las clases que componen el paquete controlador.

Clase	Descripción
OpenGLController	Esta clase maneja todos los eventos que ingresa el usuario y controla la visualización del mapa de Bogotá.
ScaleController	Esta clase maneja los eventos relacionados con la visualización de las escalas.

Tabla 8: Descripción Paquete Controlador

4.3.2. Paquete Modelo

Este componente tiene las clases que manejan la lógica del negocio (ver figura 21), donde se encuentran los algoritmos IDW e IDW2, la gestión de las estaciones y monitores, la carga de datos desde archivo o bases de datos y los modelos que hacen las representaciones gráficas.

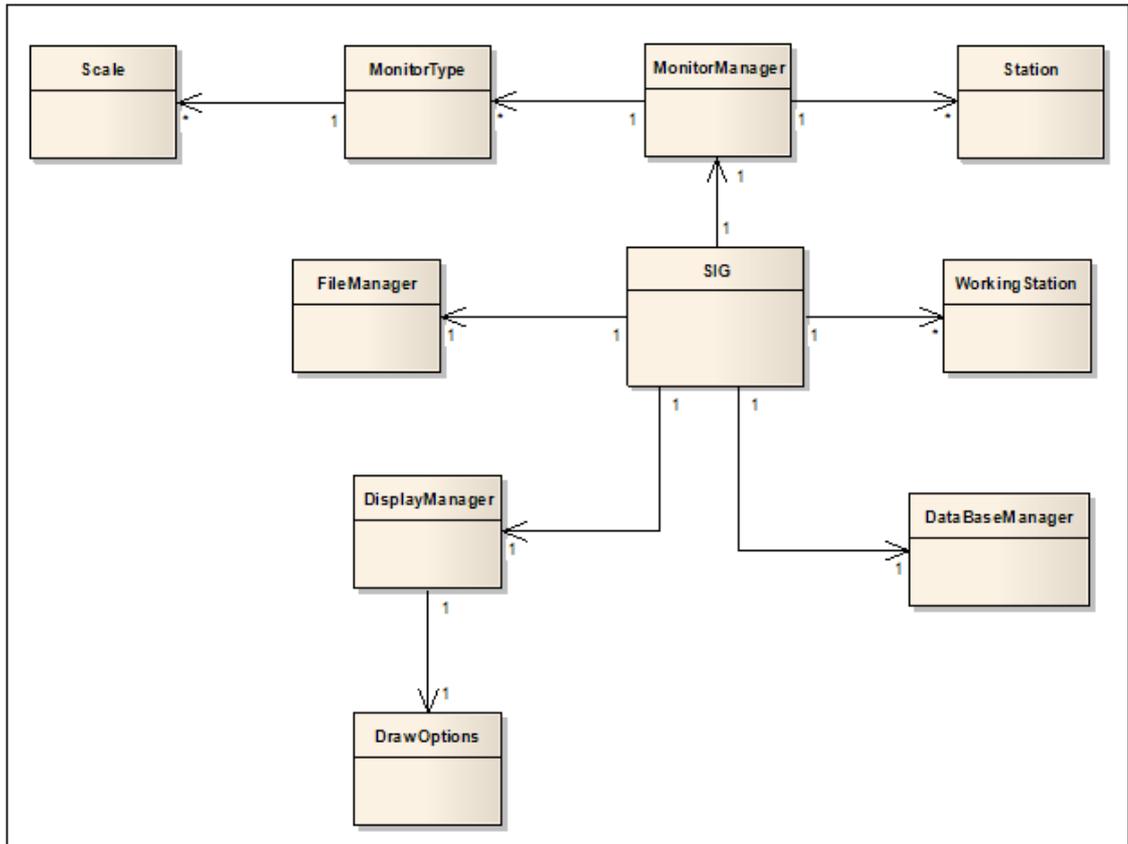


Figura 21: Descripción Paquete Modelo

En la tabla 9 se describen las clases que componen el paquete modelo.

Clase	Descripción
DataBaseManager	Esta clase se encarga de realizar la conexión y las consultas a la base de datos.
DisplayManager	Esta clase se encarga de manejar las funcionalidades que necesita OpenGL para realizar las visualizaciones.
DrawOptions	Esta clase se encarga de mantener las opciones de las visualizaciones.
FileManager	Esta clase se encarga de hacer la manipulación de archivos
MonitorManager	Esta clase gestiona los monitores
MonitorType	Esta clase representa los distintos tipos de monitores que pueden usarse para realizar las consultas
SIG	Esta es la clase principal del sistema, se encarga de manejar la entrada de datos y de los cálculos importantes para realizar la visualización, en esta se encuentran los algoritmos IDW e IDW2.
Scale	Esta clase representa las escalas que maneja un tipo de monitor.
Station	Esta clase representa las estaciones que maneja el sistema
WorkingStation	Esta clase representa las estaciones que funcionan actualmente en la visualización..

Tabla 9: Descripción Paquete Modelo

4.3.3. Paquete Vista

En este paquete están las clases que representan las interfaces gráficas del sistema (ver figura 22).

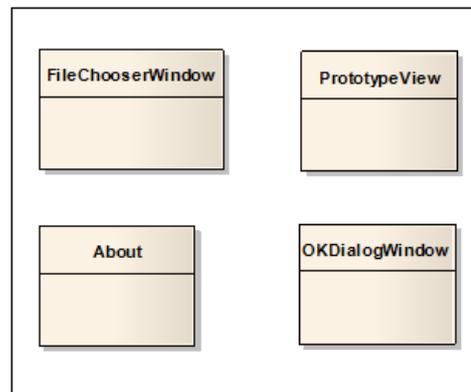


Figura 22: Paquete Vista

En la tabla 10 se describen las clases que componen el paquete Vista.

Clase	Descripción
About	Esta clase representa la interfaz gráfica de la información: "Acerca de:"
FileChooserWindow	Esta clase representa la interfaz grafica de la ventana de diálogo para abrir archivos.
OKDialogWindow	Esta clase representa la interfaz grafica de la ventana para advertencias.
PrototypeView	Esta es la clase que representa la interfaz grafica principal donde están las funcionalidades que maneja el usuario.

Tabla 10: Descripción paquete Vista

4.4. Implementación y pruebas

La etapa de implementación tuvo un progreso iterativo y estuvo ligada a las pruebas a medida que se desarrollaban las funcionalidades, el orden de este proceso fue el siguiente:

- a) Implementación del algoritmo IDW: éste fue el primer algoritmo que se desarrolló para realizar las pruebas y presentarlas a la RMCAB; fue necesario implementar el sistema para cargar datos desde un archivo de texto.
- b) Implementación del algoritmo IDW2: El algoritmo IDW2 se desarrollo con base en IDW, ya que este contaba con la aprobación de la RMCAB, y se tenía claro como tenía que funcionar.
- c) Desarrollo de las consultas de la base de datos: Una vez que se tenían los algoritmos, la RMCAB dio una muestra de dos meses de la base de datos, con ésta se realizaron las consultas para obtener datos a partir de fechas horarias y diarias.
- d) Instalación y pruebas: En esta etapa se presento el software a la RMCAB, y se fue modificando según las necesidades del cliente. También se probó el software en un equipo de la RMCAB con conexión a la base de datos, y se hicieron correcciones respecto a las consultas.

Todos los requerimientos funcionales y no funcionales se completaron, los resultados están en el plan de pruebas. La carta de satisfacción del cliente demuestra el éxito de las pruebas.

5. Pruebas y Resultados

En esta sección se presentan las pruebas y resultados científicos del prototipo

5.1. Algoritmo IDW vs Visualización en ArcView

Se realizaron pruebas para determinar si el algoritmo IDW del prototipo es el mismo que utiliza Arcview. Arcview es el sistema de información geográfico usado por la SDA para la realización de los informes.

Se realizó la comparación (ver figura 23) a partir de las concentraciones máximas de PM10 en Febrero de 2008, la figura 23 (a) fue desarrollada en Arcview y está disponible en el informe de calidad de aire del mes de Febrero de 2008 de la Secretaria de Ambiente, ésta se puede encontrar en www.dama.gov.co, en la sección de red de calidad de aire. La figura 23 (b) es el resultado de los valores ingresados al prototipo por medio de un archivo de entrada, el parámetro de potencia usado fue 2.

Las escalas de colores y los valores se definieron de acuerdo a las que se presentaron en el informe. Los valores se presentan a continuación.

Numero Estación	Nombre de la estación	Valor
8	Escuela	70
1	Bosque	82
11	Corpas	99
6	Carrefour	140
14	Font ibón	133
10	Santo Tomás	109
5	IDRD	99
13	Puente Aranda	172
9	Kennedy	161
7	Cazucá	129
3	Sony	88
4	Tunal	192

Tabla 11: Concentraciones máximas de PM10, Febrero 2008

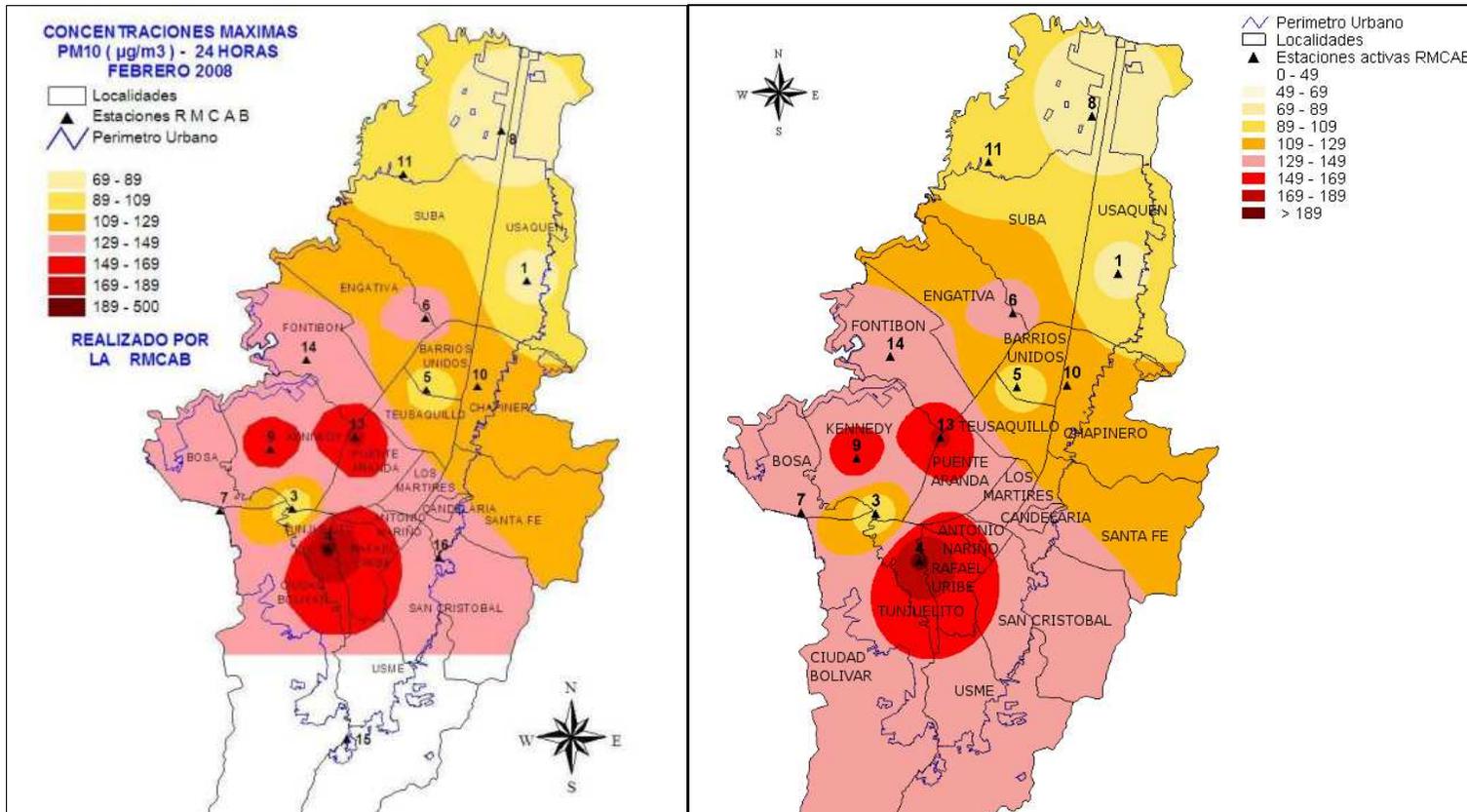


Figura 23: (a) Visualización en Arcview, (b) Visualización en el prototipo

La visualización hecha en Arcview y la del prototipo están realizadas a partir del método Inverse Distance Weighted, con el parámetro de potencia con valor 2. La prueba muestra que la distribución de los colores de la visualización del prototipo es igual o mejor a la que se está manejando en Arcview ya que se utilizan las mismas formas pero en el prototipo se presentan bordes más suaves, como se puede ver en las zonas de color rojo.

5.2. Variación de la contaminación en el tiempo.

Debido a que se propuso implementar un prototipo que permita observar la variación de la contaminación en el tiempo, se realizaron pruebas con el algoritmo IDW para observar el comportamiento de los niveles de PM10 el 1 de Diciembre de 2008. Los valores de la dispersión de la contaminación para esa fecha en las diversas estaciones y cuya unidad es $\mu\text{g}/\text{m}^3$ se muestran en la tabla 12. El promedio diario de los niveles de PM10 para esa misma fecha se presentan en la tabla 13.

Igualmente para el 1 de Diciembre de 2008, se presentan diferentes figuras: la variación de los niveles de PM10 de las estaciones se presenta en la figura 24, el promedio de los niveles de PM10 de las estaciones se muestra en la figura 25 y finalmente en la figura 26 se puede observar la variación de los niveles de contaminación, que se realizo mediante el uso del prototipo, usando el algoritmo IDW y un parámetro de potencia equivalente a 2. La variación se realizo cada hora, desde la 01:00 AM hasta las 11:00 PM.

Nombre/Hora	1 a m	2 a m	3 a m	4 a m	5 a m	6 a m	7 a m	8 a m	9 a m	10 a m
Bosque	65	62	43	38	32	37	59	111	93	90
Sony	83	46	42	55	78	101	100	255	279	140
Tunal	114	64	32	20	39	69	102	130	145	99
I.D.R.D.	46	39	27	34	30	24	22	56	64	65
Carrefour	21	22	28	23	21	16	32	54	80	66
Cazucá	43	16	17	16	41	64	62	96	92	70
Escuela	25	41	34	35	41	43	75	49	53	38
Kennedy	55	54	47	50	55	63	91	124	152	143
Sto. Tomas	64	60	57	67	35	54	79	92	111	98
Corpas	36	44	40	40	45	40	43	52	52	76
Puente Aranda	24	39	24	32	39	51	57	95	97	97
Fontibón		30	22	25	42	50	66	87	95	78
Promedio	52,4	43,1	34,4	36,25	41,5	51	65,7	100	109	88,33

11am	12m	1pm	2p m	3p m	4pm	5pm	6pm	7pm	8pm	9pm	10p m	11pm
68	61	34	41	49	51	52	65	82	101	54	86	61
98	64	113	142	129	154	91	43	73	51	127	225	157
64	88	47	62	84	78	60	35	33	49	60	62	114
31	30	34	22	51	35	24	33	49	57	66	87	95
31	20	25	26	52	42	41	36	61	69	78	78	41
96	59	42	99	120	93	48	12	16	22	29	55	56
22	16	14	11	14	28	36	30	47	52	66	76	58
95	61	67	92	63	55							
111	67	82	63	82	59	72	68	97	88	97	77	85
40	41	46	57	36	51	46	80	76	55	54	54	52
51	47	45	57	57	48	54	32	31	42	59	64	88
51	44	49	61	78	79	62	39	40	56	43	66	67
63,17	49,83	49,83	61,08	67,92	64,42	53,27	43	55	58,36	66,64	84,545	79,455

Tabla 12: Valores de PM10 el 1 de Diciembre de 2008

Nombre	Promedio Diario
Bosque	62,3913043
Sony	115,043478
Tunal	71,7391304
I.D.R.D.	44,3913043
Carrefour	41,8695652
Cazucá	54,9565217
Escuela	39,3043478
Kennedy	79,1875
Sto. Tomas	76,7391304
Corpas	50,2608696
Puente Aranda	53,4782609
Fontibón	55,9090909

Tabla 13: Promedio diario de los niveles de PM10, 1 de Junio 2008

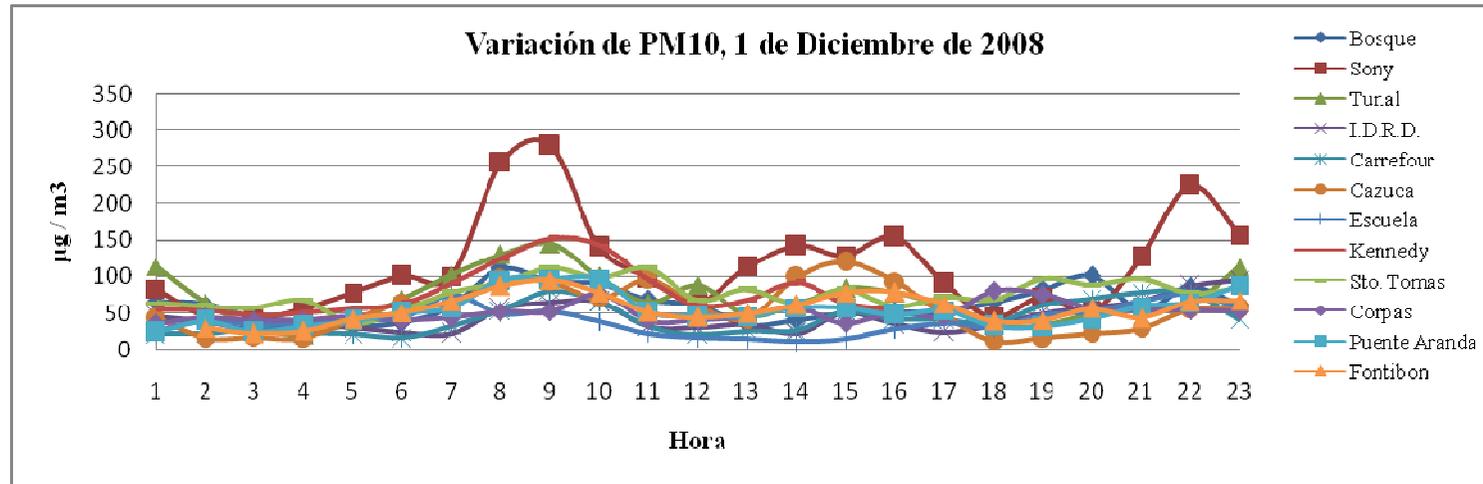


Figura 24: Variación PM10 en las estaciones, 1 Junio 2008

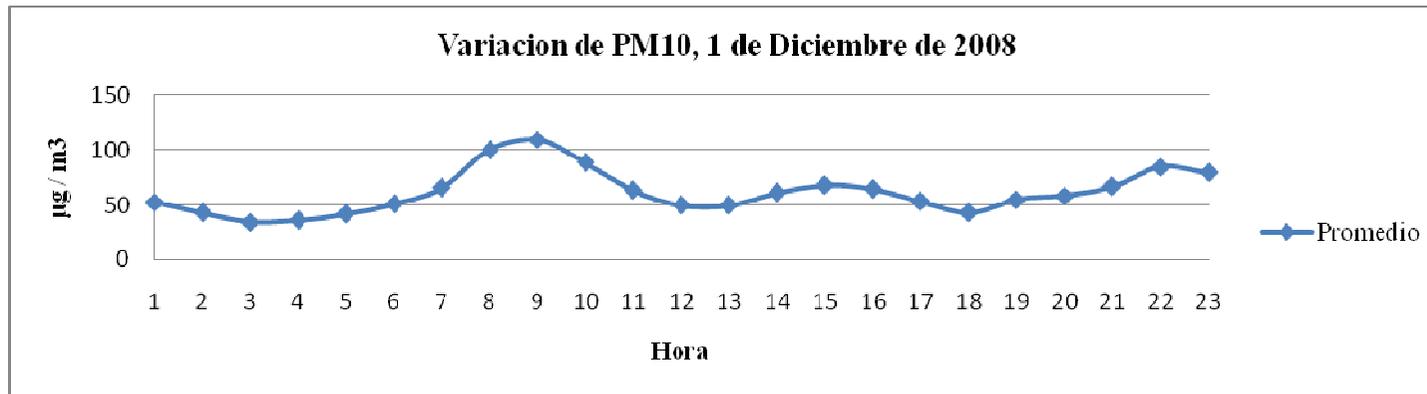


Figura 25: Variación PM10, promedio de las estaciones

Figura 26 (1/3): Variación en el tiempo de los niveles de PM10 el 1 de Junio de 2008, Algoritmo IDW, Potencia 2

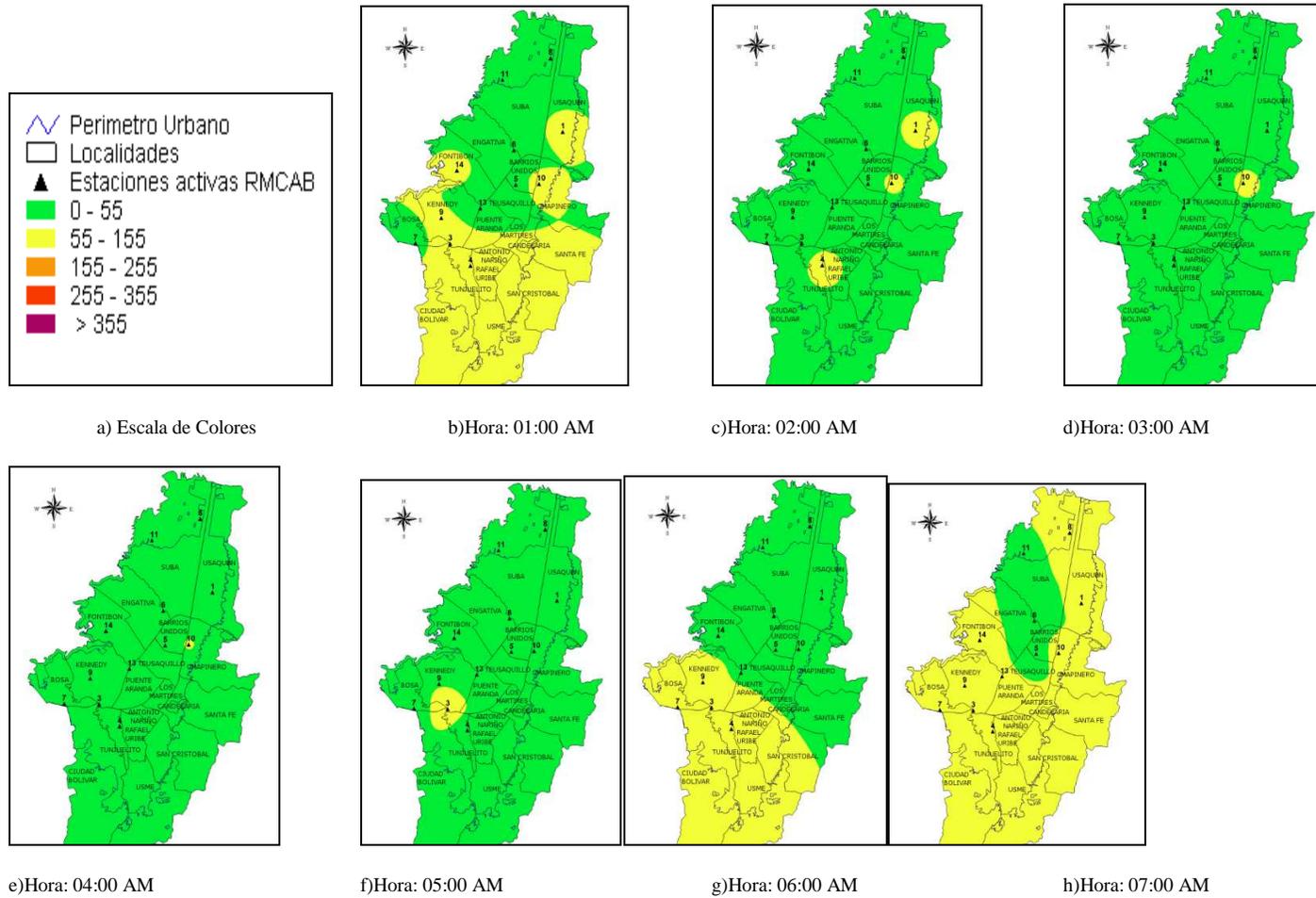
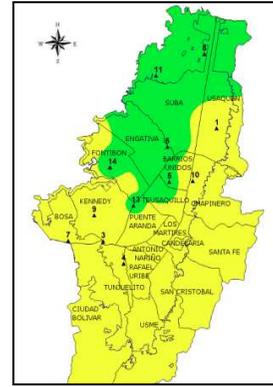
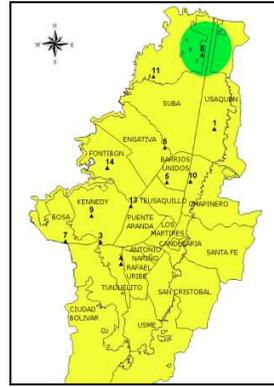
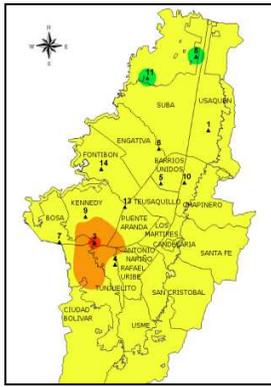
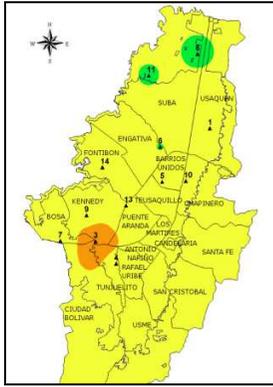


Figura 27 (2/3): Variación en el tiempo de los niveles de PM10 el 1 de Junio de 2008, Algoritmo IDW, Potencia 2



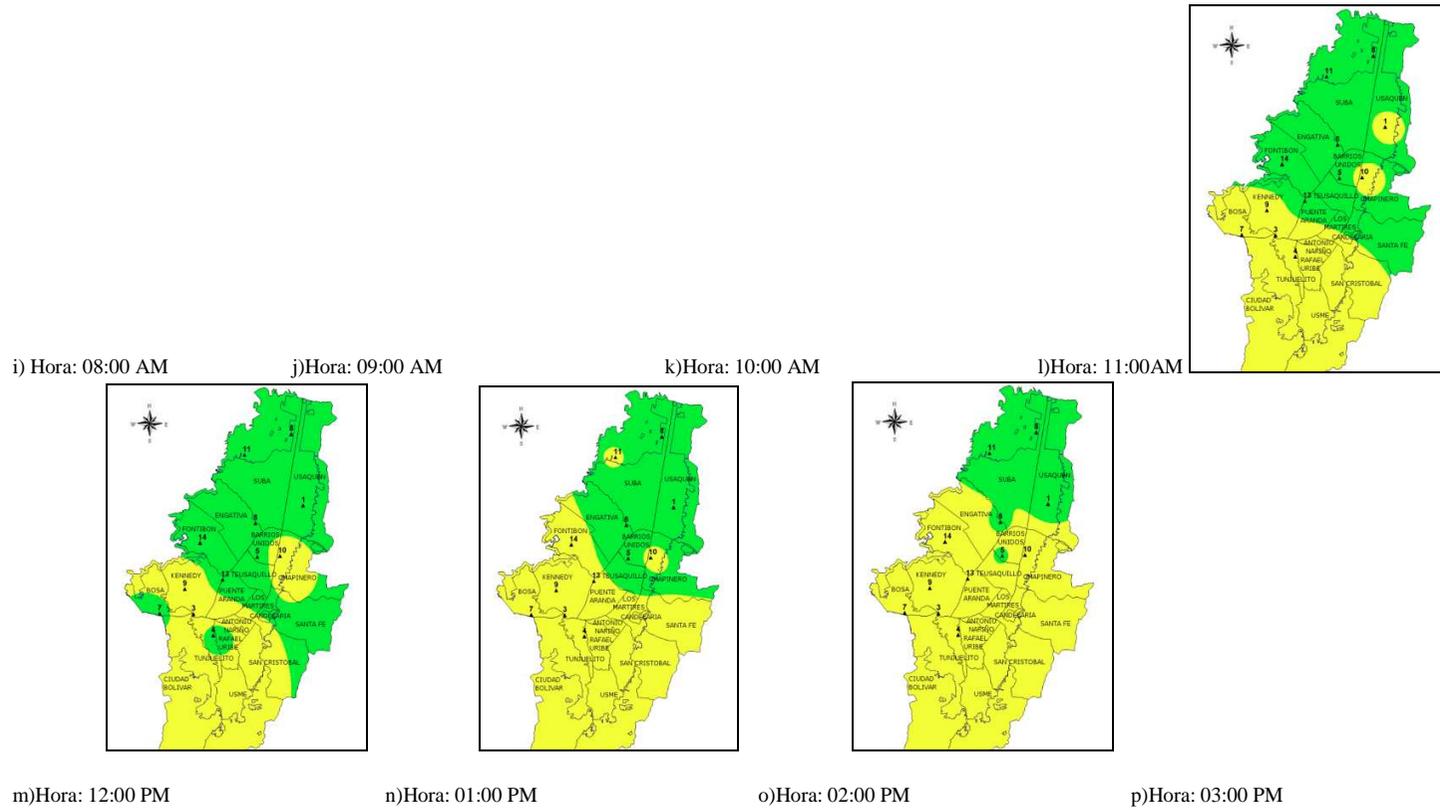
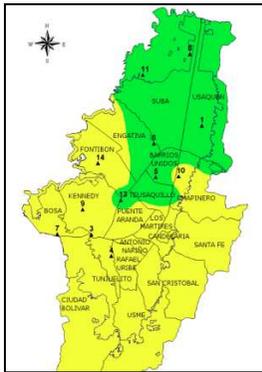
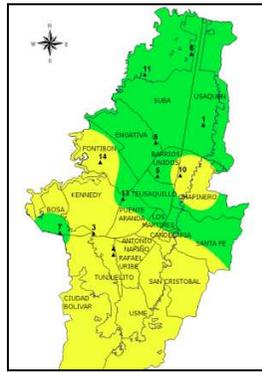


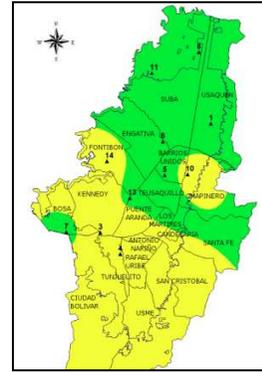
Figura 28 (3/3): Variación en el tiempo de los niveles de PM10 el 1 de Junio de 2008, Algoritmo IDW, Potencia 2



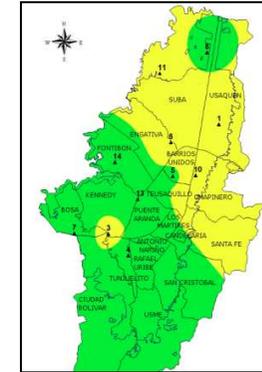
q) Hora: 04:00 PM



r) Hora: 05:00 PM



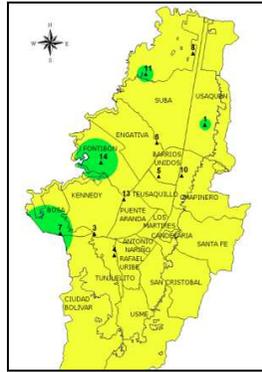
s) Hora: 06:00 PM



t) Hora: 07:00 PM



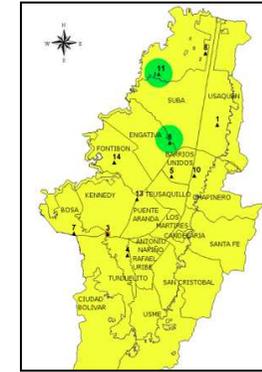
u) Hora: 08:00 PM



v) Hora: 09:00 PM



w) Hora: 10:00 PM



x) Hora: 11:00 PM

Como se muestra en las figuras 24 y 25 los niveles de contaminación fluctúan todo el tiempo, por ejemplo se puede ver la variación desde las 04:00AM hasta las 09:00AM, donde se observa el aumento de los niveles de contaminación, que podría verse afectado por la hora donde la mayoría de habitantes salen a realizar distintas actividades

También se puede observar que los niveles más altos de contaminación se encuentran entre las 07:00 AM y 09:00 AM, y los niveles más bajos entre las 2:00AM y 05:00 AM.

Según la tabla 13 la estación que presenta mayor concentración de PM10 es Sony, y la que presenta menor concentración es Escuela.

Los valores que están las tablas no son suficientes para que las personas conozcan el estado de la contaminación en la ciudad. Pero gracias al prototipo para visualizar la contaminación se puede observar cuales localidades están más contaminadas, y en qué momento, como se muestra en la figura 26.

Por ejemplo se puede conocer que a las 09:00 AM las localidades más contaminadas son: Kennedy, Puente Aranda y Tunjuelito que constituyen la zona industrial de Bogotá, mientras que los lugares que presentan menos contaminación son las que están al norte de la ciudad, como Usaquén.

Los resultados de los niveles de contaminación también se pueden conocer con el algoritmo IDW2. Este algoritmo da un radio de alcance a cada estación con el fin de no visualizar zonas que están muy lejanas a las estaciones de monitoreo. Las pruebas del algoritmo IDW2 se presentan en la siguiente sección.

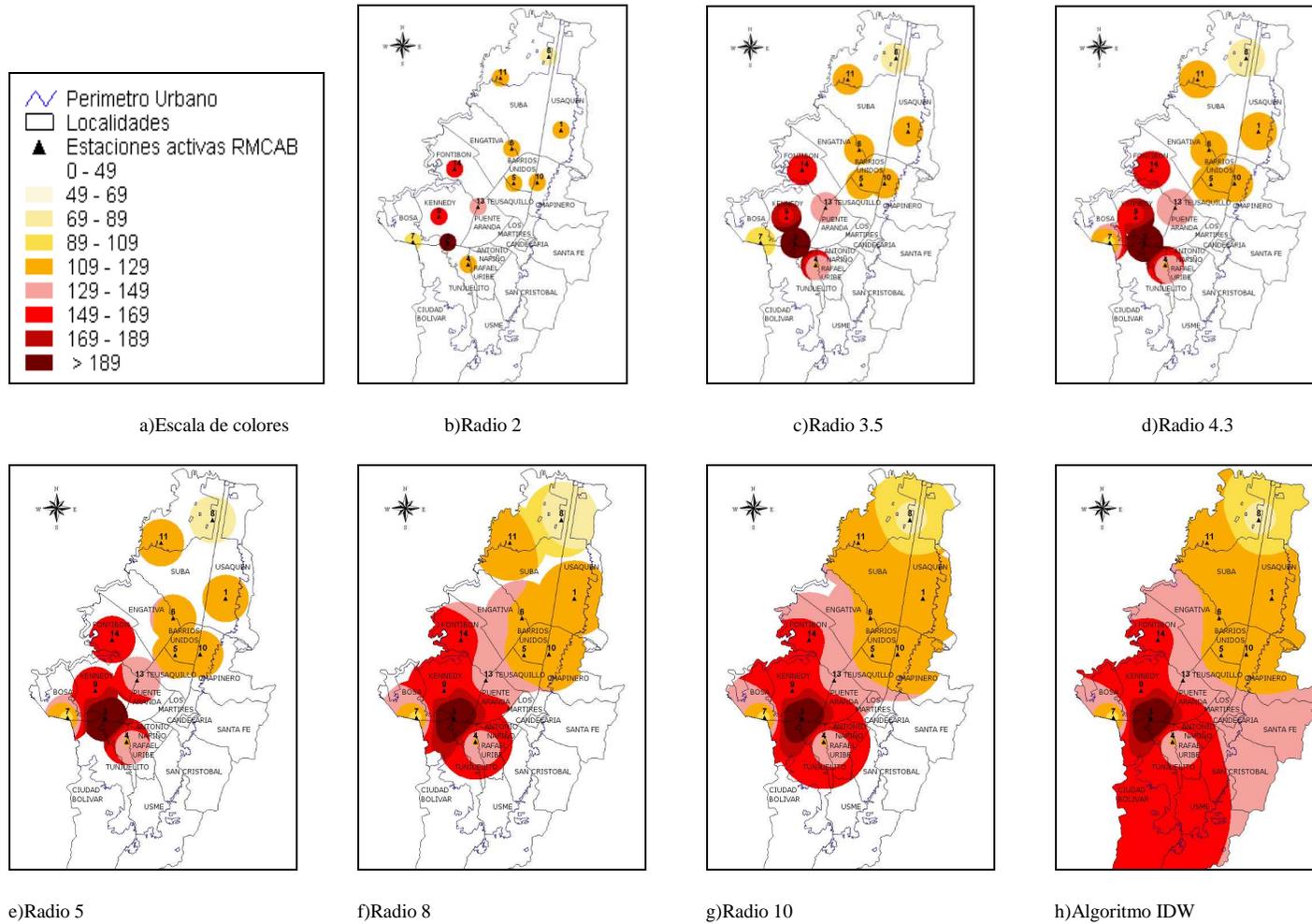
5.3. Variación del radio para el algoritmo IDW2

El algoritmo IDW2 permite establecer un radio de alcance para la interacción entre estaciones. Para probarlo se ingresaron los datos presentados en la tabla 14 y se estableció 2 como el parámetro de potencia. En la figura 27 se presentan los resultados de la variación del radio, mediante el uso del prototipo con una potencia equivalente a 2.

Numero Estación	Nombre	Valor PM10 ($\mu\text{g} / \text{m}^3$)
1	Bosque	117
3	Sony	300
4	Tunal	127
5	I.D.R.D	114
6	Carrefour	127
7	Cazucá	102
8	Escuela	81
9	Kennedy	161
10	Sto. Tomas	113
11	Corpas	123
13	Puente Aranda	138
14	Fontibón	155

Tabla 14: Valores de prueba para IDW2

Figura 29: Variación del radio, Algoritmo IDW2, Potencia 2



Como se muestra en la figura 27, con el uso del algoritmo IDW2, el radio determina el alcance para que las estaciones interactúen. Este algoritmo agrupa diferentes grupos de estaciones, y para cada grupo se realiza una interpolación diferente. Por ejemplo, para radio 2 hay 12 grupos, para radio 4.3 existen 7 grupos y para un radio que abarque todas las estaciones, existe un solo grupo y la interpolación es la misma que la del algoritmo IDW, como se muestra con el radio 10.

5.4. Variación de la potencia para el algoritmo IDW

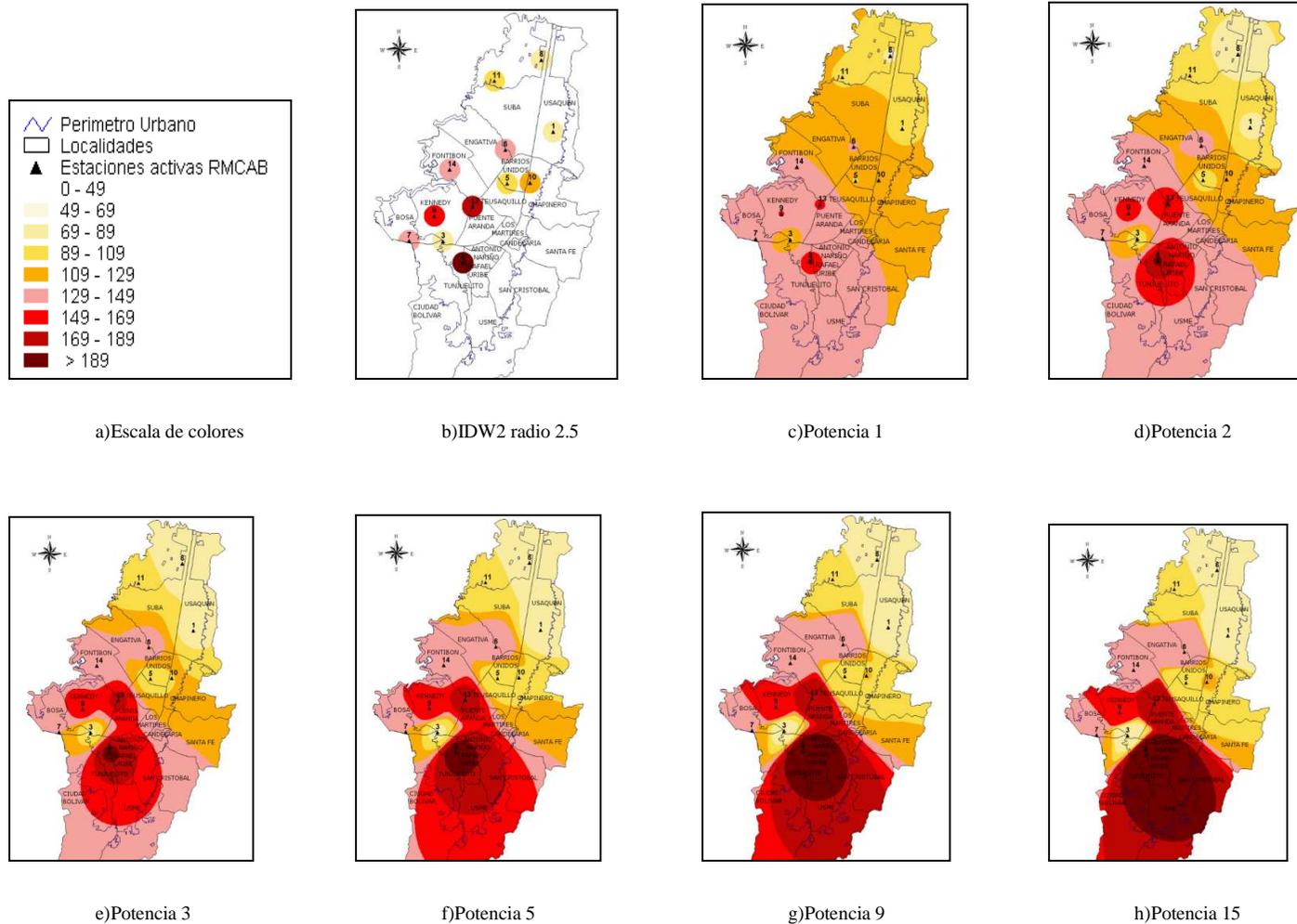
A continuación se presentan las pruebas del parámetro de potencia. La potencia permite controlar la importancia que tienen los puntos conocidos en los que son procesados, a partir de su distancia. Al definir una potencia mayor, se hace más énfasis en los puntos cercanos. A medida que la potencia incrementa, los valores interpolados empezarán a acercarse al valor del punto de muestra más cercano. Al especificar una potencia menor, se da más influencia a los puntos lejanos. Una potencia de valor 2 es la más utilizada, y es la que se maneja por defecto para el algoritmo IDW. Para el algoritmo IDW2 se maneja por defecto un valor de 10 por petición de la SDA.

Para la prueba se usaron los valores que se muestran en la tabla 15 y los resultados del uso del prototipo mediante el algoritmo IDW se encuentran en la figura 28.

Numero Estación	Nombre de la estación	Valor
8	Escuela	70
1	Bosque	82
11	Corpas	99
6	Carrefour	140
14	Fontibón	133
10	Santo tomas	109
5	IDRD	99
13	Puente Aranda	172
9	Kennedy	161
7	Cazucá	129
3	Sony	88
4	Tunal	192

Tabla 15: Valores para probar el parametro de potencia

Figura 30: Variación de la potencia, algoritmo IDW



Como se puede notar en la figura 28, al incrementar el valor de potencia, los colores procesados empiezan a parecerse más al valor más cercano. Esto es útil para diferentes casos, por ejemplo: la zona norte de Bogotá. Esta zona se aproxima a lugares rurales donde la contaminación es muy poca, por eso, es mejor visualizarla con un parámetro de potencia alto, ya que se estaría afirmando que la salida de Bogotá por el norte tiene valores bajos de contaminación.

Por otro lado, los parámetros altos no son útiles cuando los niveles de contaminación son grandes, como se observa en la figura 22 (potencia 9 y 15), ya que estaría interpretando que esas zonas están altamente contaminadas, cuando realmente el valor es desconocido.

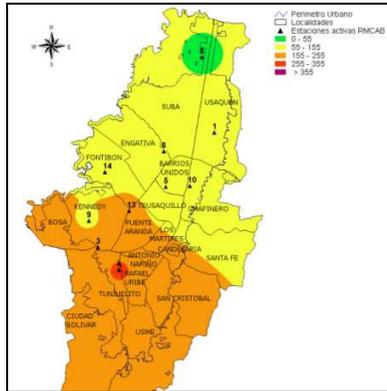
Por eso, el valor de potencia debe ser asignado dependiendo del número de estaciones y el tipo de comportamiento que se esperaría que obtuviera. Si la información no es suficiente es recomendable utilizar el algoritmo IDW2.

5.5. Variación del tipo de monitores

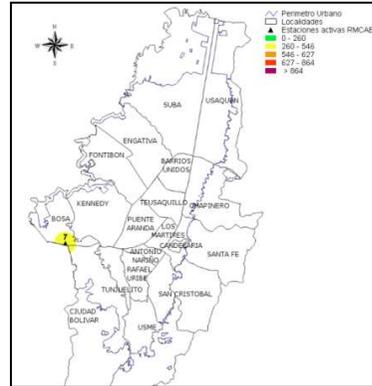
A continuación se visualizan diferentes tipos de contaminantes para un mismo día. El prototipo cambia de algoritmo a partir del número de estaciones, este valor está establecido por defecto en 7, es decir que si hay más de 7 estaciones, se usa el algoritmo IDW, en caso contrario se usa el IDW2. Esto se debe a que cuando no hay suficiente información no se puede mostrar la contaminación en todo el mapa.

La prueba se realizó para el día 15 de Diciembre de 2008, a las 09:00 AM. Los resultados se muestran en la figura 29.

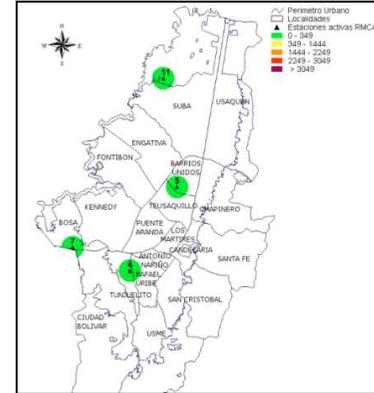
Figura 31: Diferentes tipos de monitores para 15 de Diciembre de 2008, Hora 09:00 AM



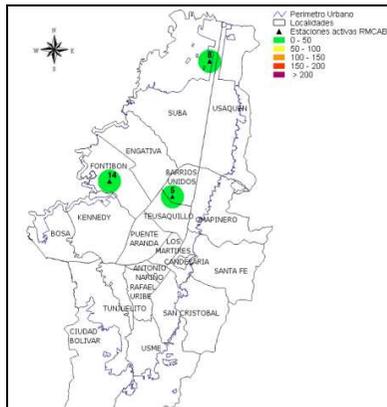
a)PM10, Algoritmo IDW



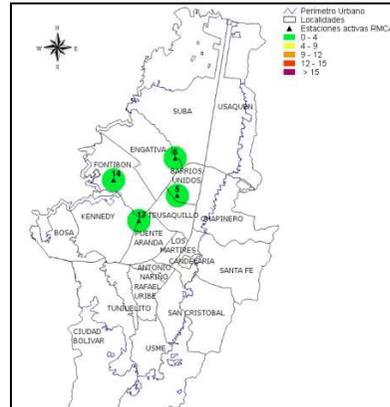
b)PST, Algoritmo IDW2



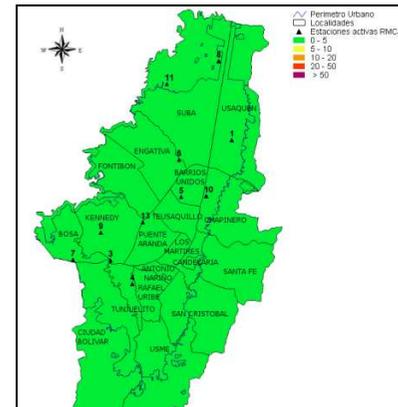
c)SO2, Algoritmo IDW2



d)NO2, Algoritmo IDW2



e)CO, Algoritmo IDW2



f)Lluvia, Algoritmo IDW

Como se muestra en la figura 29, el número de estaciones es un factor importante para escoger el algoritmo de visualización. Como se puede observar, los contaminantes PST, CO₂, NO₂ y CO no tienen suficiente información para visualizar los índices en toda la ciudad. Se utilizó el algoritmo IDW₂ para que la información presentada sea confiable.

6. Conclusiones

- El Prototipo para visualizar la contaminación en el aire de Bogotá es viable y aporta una solución a los siguientes inconvenientes respecto al modelo de visualización utilizado actualmente por la SDA:
 - El número de estaciones de monitoreo no es suficiente para mostrar la información de la contaminación de toda la ciudad.
 - Los índices de la contaminación atmosférica fluctúan muy rápido en el tiempo.
- La SDA usa el método de interpolación IDW por medio de la herramienta ArcView. Este método se implementó en el prototipo.
- Los resultados de la visualización mediante el prototipo son iguales o mejores que los que maneja la herramienta ArcView.
- El algoritmo de visualización IDW2 permite visualizar la información de la contaminación en el aire de la ciudad, de manera confiable al permitir establecer rangos de alcance, de esta forma, si un punto de la ciudad esta muy alejado de la zona de muestreo, ese punto no será tenido en cuenta.
- El prototipo para visualizar la contaminación en el aire de Bogotá permite incorporar las funcionalidades de los dos algoritmos.
- El prototipo se puede conectar a la base de datos de la SDA y realizar consultas de tipo horario (Día, Mes, Año, Hora) y diario (Día, Mes, Año).
- El uso del algoritmo IDW2 es útil para los casos cuando no se tiene suficiente información para realizar las visualizaciones.
- El prototipo permite observar la variación en el tiempo de la contaminación en la ciudad dando a conocer los lugares donde se encuentran los mayores y menores índices de contaminación.

7. Referencias

1. **Nieto, J. A.** Control a la contaminación en el aire. *Secretaría de Ambiente*. [En línea] www.secretariadeambiente.gov.co/sda/libreria/pdf/Control%20a%20la%20contaminacion%20del%20aire.pdf.
2. **The World Bank.** Air Pollution. [En línea] http://siteresources.worldbank.org/DATASTATISTICS/Resources/table3_13.pdf.
3. **HEVAC.** “Indoor air quality, Global Warming and Energy Efficiency”. [En línea] www.feta.co.uk/hevac/downloads/iaq/iaq04.pdf.
4. **Secretaría Distrital de Ambiente.** Secretaría Distrital de Ambiente/Reportes Anuales. *Secretaría Distrital de Ambiente*. [En línea] <http://www.secretariadeambiente.gov.co/sda/libreria/php/decide.php?patron=03.140302>.
5. *Relación entre PM2.5 y PM10 en la ciudad de Bogotá.* **Rojas, N. y Galvis, B.** Bogotá : Revista de Ingeniería, Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes, 2005.
6. **Real, John.** *Levantamiento de información en la RMCAB, Secretaría Distrital de Ambiente.* Bogotá, 2009.
7. *Actitud de los españoles frente a los problemas ambientales.* **Curiel, E.** s.l. : Observatorio Medioambiental, 2000, Vol. 3.
8. **Friendly, M.** Milestones in the history of thematic cartography, statistical graphics, and data visualization. [En línea] 2008. <http://www.math.yorku.ca/SCS/Gallery/milestone/milestone.pdf>.
9. **Organización Mundial de la Salud.** Meteorología de la contaminación atmosférica. *Manual de Calidad del Aire en el Medio Urbano.* Mexico : Publicaciones Biomédicas y de Salud, 1980, pág. 116.
10. **Secretaría Distrital De Ambiente.** Secretaría Distrital de Ambiente. [En línea] <http://www.secretariadeambiente.gov.co/sda/libreria/php/decide.php?patron=01..>
11. **Secretaría Distrital de Ambiente.** Localización geográfica de la Red de Monitoreo de Calidad de Aire - RMCAB. [En línea] http://www.secretariadeambiente.gov.co/sda/libreria/gif/Mapa_RMCAB.gif.
12. **EPA.** Sobre la EPA | EPA en español. *Agencia de Protección Ambiental de EE.UU.* [En línea] <http://www.epa.gov/espanol/sobreepa.htm>.

13. Geografía Bogotana. *Portal de la ciudad Bogotá*. [En línea] 30 de Septiembre de 2008. [Citado el: 15 de Mayo de 2009.] <http://www.bogota.gov.co/portel/libreria/php/decide.php?patron=01.270701&divs=true>.
14. **Ideam**. Contaminación atmosférica (Caso Bogotá). *Ideam*. [En línea] [Citado el: 15 de Mayo de 2009.] <http://www.ideam.gov.co/files/atlas/Contaminación.htm>.
15. **ESRI**. What is GIS? *GIS.com*. [En línea] <http://www.gis.com/whatisgis/>.
16. *Visualization in Scientific Computing*. **McCormick, B., DeFanti, H. y Brown, M.** Computer Graphics, 1987.
17. The Encyclopedia Britannica. *Meteorology*. 2005.
18. **Organización Panamericana de la Salud**. Transporte y dispersión de contaminantes en el aire ambiental. *Biblioteca virtual de desarrollo sostenible y salud ambiental*. [En línea] www.cepis.ops-oms.org/bvsci/e/fulltext/orienta2/cap6c.pdf.
19. **Barrientos, Miguel**. 3D Analyst, Arctoolbox:Guía Rápida de herramientas. *gabrielortiz*. [En línea] [Citado el:] www.gabrielortiz.com/descargas/3D_Analyst_9_2.pdf.
20. **Colin, Childs**. Interpolating surface in ArcGIS Spatial Analyst. *ESRI*. [En línea] [Citado el:] www.esri.com/news/arcuser/0704/files/interpolating.pdf.
21. **marino, Ministerio de medio ambiente y medio rural y. PRTR ESPAÑA**. [En línea] 2007. [Citado el: 13 de Mayo de 2009.] <http://www.prtr-es.es/Particulas-PM10,15673,11,2007.html>.
22. **Gobierno del Estado de Nuevo León**. Características de los Contaminantes. *Nuevo León*. [En línea] http://www.nl.gob.mx/?P=med_amb_mej_amb_sima_cont.
23. **Air Info Now**. ¿Qué es Monóxido de Carbono (CO)? *Air Info Now*. [En línea] http://www.airinfonow.com/espanol/html/ed_co.html.
24. **Instituto Virtual Ingefor**. Glosario Geográfico y Ambiental. *Ingefor*. [En línea] <http://www.geocities.com/institutoingefor/glosario/p.html>.
25. **Ecodes**. Boletín - Salud y Medio Ambiente. *Ecodes*. [En línea] http://www.ecodes.org/boletin_SP/boletinseptiembre08.html.
26. **SIMAT**. Sistema Atmosférico de la ciudad de México. [En línea] [Citado el: 19 de mayo de 2009.] <http://www.sma.df.gob.mx/simat/pnlluvia.htm>.

27. **AMBIENTE, COMISION NACIONAL DEL MEDIO.** Gobierno Chile, Comision nacional medio ambiente. [En línea] [Citado el: 19 de mayo de 2009.] <http://www.conama.cl/rm/568/article-1156.html>.
28. OpenGL Overview. *OpenGL*. [En línea] [Citado el: 16 de Mayo de 2009.] <http://www.opengl.org/about/overview/#1>.
29. **ESRI.** ArcView Overview. *ESRI*. [En línea] [Citado el: Mayo de 19 de 2009.] <http://www.esri.com/software/arcgis/arcview/index.html>.
30. **Oracle.** Oracel Database 10g Express Edition. *Oracle Technology Network*. [En línea] [Citado el:] <http://www.oracle.com/technology/products/database/xe/index.html>.
31. **ArcGis.** ArcGis Desktop Help - Implementing Inverse Distance Weighted (IDW). *ArcGis*. [En línea] 2 de Mayo de 2007. [Citado el: 20 de Mayo de 2009.] [http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm?TopicName=Implementing_Inverse_Distance_Weighted_\(IDW\)](http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm?TopicName=Implementing_Inverse_Distance_Weighted_(IDW)).
32. Shepards Method. *ems-i*. [En línea] [Citado el: 20 de Mayo de 2009.] http://www.ems-i.com/gmshelp/Interpolation/Interpolation_Schemes/Inverse_Distance_Weighted/Shepards_Method.htm.
33. *La Interpolación Como Método De Representación Cartográfica Para La Distribución De La Población: Aplicación A La Provincia De Albacete.* **García González, J. A. y Cebrían Abellán, F.** Albacete : El acceso a la información espacial y las nuevas tecnologías geográficas.
34. **Framework Studio.** Pattern: Model-View-Controller. *vico*. [En línea] <http://www.vico.org/pages/PatronsDisseny/Pattern%20Model%20View%20Controller/>.
35. **Florian, Laura y Carranza, Fredy.** OpenGL y VTK. Trujillo : Universidad Nacional de Trujillo, 2006.